

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



TRABAJO FIN DE MÁSTER

Estructura EBG como filtro de rechazo de bandas

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

Autor: Fabian Pizarro, Julio Cesar

Tutor: Taha Ahmed, Bazil

Junio, 2021

ESTRUCTURA EBG COMO FILTRO DE RECHAZO DE BANDAS

AUTOR: Julio Cesar Fabian Pizarro
TUTOR: Bazil Taha Ahmed

Dpto. De Tecnología electrónica y de las Comunicaciones

Escuela Politécnica Superior

Universidad Autónoma de Madrid

Junio 2021



Agradecimientos

Agradecimiento a mi familia por su apoyo pero en especial a mi abuelita Lourdes que siempre estuvo apoyándome con los estudios, siempre dándome ánimos para terminar esta etapa final de la carrera en momentos difíciles. No podré enseñarte el fin de esta etapa pero pongo estas breves líneas en agradecimiento eterno hacia ti.

Y no menos importante agradecer a mi tutor Bazil que en estos tiempos de pandemia estuvo disponible la mayoría del tiempo. Como anécdota contar el día que se quedó conmigo por videoconferencia ayudándome a soldar uno de los filtros para su posterior medida, estuvo conmigo hasta que salí del laboratorio, que no fue poco tiempo y era un viernes por la tarde! De hecho este TFM al inicio no hubiese sido posible avanzar sin la ayuda del profesor en la etapa final de este trabajo así como su paciencia a la hora de darme las contraseñas de acceso remoto a los ordenadores de la universidad.

No quiero dejar de lado a los docentes y miembros de la universidad que han sido muy amables y pacientes en mi trayecto por esta universidad. Ha sido una buena etapa, dura pero buena.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA	2
2 ESTADO DEL ARTE	3
2.1 CONCEPTO DE FILTRO	3
2.2 TIPOS DE FILTROS	3
2.3 BANDAS DE FRECUENCIAS	5
2.4 ESTRUCTURA EBG	6
2.4.1 Tipos de estructuras EBG	6
2.4.2 Aplicaciones de estructuras EBG para uso en antenas	8
2.4.3 Aplicaciones de estructuras EBG para filtros	9
3 ANÁLISIS Y DISEÑO	10
3.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS	10
3.1.1 Modelo circuital LC	10
3.1.2 Diagrama de dispersión	12
3.2 ESTUDIO DE ESTRUCTURA EBG DE TIPO MUSHROOM	19
3.2.1 EBG Planar	34
3.3 ESTUDIO DE DISTINTAS FORMAS DE CELDAS EBG	36
3.3.1 Estructura EBG de 2 Celdas	36
3.3.2 Estructura EBG de 4 Celdas	38
3.3.3 Estructura EBG de 6 Celdas	41
3.3.4 Estructura EBG con forma de cruz	43
3.3.5 Estructura EBG de Espiral	45
4 INTEGRACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	47
4.1 FILTRO DE FRECUENCIAS A 3.5 GHz y 5.5 GHz	47
4.2 FILTRO DE FRECUENCIAS A 5.5 GHz y 7.5 GHz	53
4.3 FILTRO DE FRECUENCIAS A 3.5 GHz y 7.5 GHz	62
4.4 FILTRO DE FRECUENCIAS A 3 BANDAS: 3.5 GHz, 5.5 GHz y 7.5 GHz	67
5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	73
5.1 CONCLUSIONES	73
5.2 TRABAJO FUTURO	77
6 REFERENCIAS	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Respuesta de un filtro paso bajo [2].	3
Figura 2.2 Respuesta de un filtro paso alto [2].	4
Figura 2.3 Respuesta de un filtro paso banda [2].	4
Figura 2.4 Respuesta de un filtro banda eliminada [2].	5
Figura 2.5. Estructura EBG de 3 dimensiones [6].	7
Figura 2.6. Estructura EBG de tipo mushroom u hongo (a) y estructura EBG planar (b).[7]	8
Figura 2.7. Dos configuraciones de una estructura EBG de una dimensión [8].	8
Figura 3.1 Parámetros de una estructura EBG tipo mushroom	10
Figura 3.2 Identificación de parámetros para modelado LC	11
Figura 3.3 Modelo tank LC equivalente	11
Figura 3.4. Celda unidad con su respectiva zona de Brillouin,	13
Figura 3.5. Diagrama de dispersión obtenido de la bibliografía [25].	14
Figura 3.6. Configuración del entorno de simulación-primer paso.	15
Figura 3.7. Configuración del entorno de simulación-segundo paso.	15
Figura 3.8. Configuración del entorno de simulación-tercer paso.	16
Figura 3.9. Configuración del entorno de simulación-cuarto paso.	16
Figura 3.10. Configuración del entorno de simulación-quinto paso.	16
Figura 3.11. Configuración del entorno de simulación-sexto paso.	17
Figura 3.12. Configuración del entorno de simulación-séptimo paso.	17
Figura 3.13. Configuración del entorno de simulación-octavo paso.	18
Figura 3.14. Configuración del entorno de simulación-noveno paso.	18
Figura 3.15. Dimensiones y configuración del contorno a simular para obtener un diagrama de dispersión [7].	19
Figura 3.16. Estructura EBG desde una vista superior.	19
Figura 3.17. Estructura EBG desde una vista frontal	20
Figura 3.18. Configuración de los puertos usando la calculadora de CST Studio.	20
Figura 3.19. Diagrama de circuitos equivalente al simulado en CST Studio.	20
Figura 3.20. Vista frontal equivalente al modelo LC anterior.	21
Figura 3.21. Parámetro S21 de la celda unitaria básica tipo mushroom.	22
Figura 3.22. Parámetro S11 de la celda unitaria básica tipo mushroom.	22
Figura 3.23. Parámetro S21 variando g(gap).	23
Figura 3.24. Parámetro S11 variando g(gap).	23
Figura 3.25. Parámetro S21 variando W(ancho).	24
Figura 3.26. Parámetro S11 variando W(ancho).	24
Figura 3.27. Parámetro S21 variando radio.	25
Figura 3.28. Parámetro S11 variando radio.	25
Figura 3.29. Parámetro S21 variando hs (espesor del sustrato).	26
Figura 3.30. Parámetro S11 variando hs (espesor del sustrato).	27
Figura 3.31. Parámetro S21 variando la posición Y de la vía.	27
Figura 3.32. Parámetro S11 variando la posición Y de la vía.	28
Figura 3.33. Relación entre el parámetro g y la frecuencia.	28
Figura 3.34. Relación entre el parámetro g y S21 .	29
Figura 3.35. Relación entre el parámetro W y la frecuencia.	29
Figura 3.36. Relación entre el parámetro W y S21 .	30
Figura 3.37. Relación entre el parámetro radio y la frecuencia.	30
Figura 3.38. Relación entre el parámetro radio y S21 .	31
Figura 3.39. Relación entre el parámetro hs y la frecuencia.	31

Figura 3.40.Relación entre el parámetro h_s y $ S_{21} $.	32
Figura 3.41.Diagrama de dispersión de la estructura EBG de tipo mushroom.	33
Figura 3.42.Parámetro S_{21} respecto a varios tipos de sustratos.	34
Figura 3.43Diferencias entre una estructura EBG mushroom y planar [28].	34
Figura 3.44.Parámetro S_{21} de la estructura EBG planar.	35
Figura 3.45.Modelo de estructura EBG compuesta por dos celdas de tipos mushroom.	36
Figura 3.46.Parámetros S_{21} y S_{11} del modelo propuesto.	36
Figura 3.47.Vista superior del modelo propuesto (a) y circuito equivalente LC (b).	37
Figura 3.48 Modelo a simular con línea de alimentación en una esquina.	37
Figura 3.49Circuito equivalente LC de la figura 3.50.	38
Figura 3.50.Modelo de estructura EBG compuesta por 4 celdas de tipo mushroom.	38
Figura 3.51.Parámetros S_{21} del modelo propuesto.	39
Figura 3.52.Vista superior del modelo propuesto (a) y circuito equivalente LC (b).	39
Figura 3.53.Efecto de variar el gap entre celdas en las pérdidas de inserción.	40
Figura 3.54.Parámetro S_{21} del modelo propuesto teniendo el gap un valor de 5mm.	40
Figura 3.55.Parámetro S_{21} aumentando las dimensiones de las celdas unitarias.	41
Figura 3.56.Modelo de estructura EBG compuesta por 6 celdas de tipo mushroom (a), modelo equivalente del circuito (b).	42
Figura 3.57.Parámetro S_{21} del modelo de 6 celdas.	43
Figura 3.58.Modelo de estructura EBG con forma de cruz.	43
Figura 3.59Modelo equivalente LC de una celda EBG con forma de cruz.	44
Figura 3.60.Parámetro S_{21} del modelo EBG con forma de cruz.	44
Figura 3.61.Parámetro S_{21} variando el ancho de la estructura.	45
Figura 3.62 Parámetro S_{21} del modelo EBG con forma de espiral.	45
Figura 3.63Parámetro S_{21} del modelo EBG con forma de espiral.	46
Figura 4.1.Modelo EBG para obtener un filtro cercano a los 3.5 GHz y 5.5 GHz.	47
Figura 4.2.Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión	48
Figura 4.3.Efecto de variar las dimensiones de la estructura EBG en general.	48
Figura 4.4.Efecto de variar el radio.	49
Figura 4.5 Efecto de variar la profundidad de la abertura.	49
Figura 4.6 Efecto de variar la altura de la abertura.	50
Figura 4.7.Efecto de variar la altura de la vía (eje Y).	50
Figura 4.8.Efecto de variar el ancho de la abertura.	51
Figura 4.9.Perdidas de inserción con las dos bandas de frecuencia propuestas.	51
Figura 4.10.Diagrama de dispersión del filtro propuesto.	52
Figura 4.11.Modelo EBG para obtener un filtro en bandas 5.5 GHz y 7.5 GHz.	53
Figura 4.12.Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión.	53
Figura 4.13.Efecto de variar la altura de la celda EBG.	54
Figura 4.14.Efecto de variar la anchura de la celda EBG.	55
Figura 4.15.Efecto de variar el ancho de la primera abertura.	55
Figura 4.16.Efecto de variar el ancho de la segunda abertura.	56
Figura 4.17.Efecto de variar la profundidad de la primera abertura.	56
Figura 4.18.Efecto de variar la profundidad de la segunda abertura.	57
Figura 4.19.Perdidas de inserción con las dos bandas de frecuencia propuestas.	57
Figura 4.20.Diagrama de dispersión del filtro propuesto.	58
Figura 4.21 Celda EBG con una ranura.	59
Figura 4.22 Parámetro S_{21} de la celda EBG con una ranura	59
Figura 4.23 Celda EBG con dos ranuras	60
Figura 4.24 Parámetro S_{21} de la celda EBG con dos ranuras	60
Figura 4.25 Celda EBG con tres ranuras	61

Figura 4.26 Parámetro S21 de la celda EBG con tres ranuras.....	61
Figura 4.27. Modelo EBG para obtener un filtro en bandas 3.5 GHz y 7.5 GHz.	63
Figura 4.28. Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión.	63
Figura 4.29. Efecto de variar la profundidad de la primera abertura.....	64
Figura 4.30. Efecto de variar la profundidad de la segunda abertura.	64
Figura 4.31. Efecto de variar el radio.	65
Figura 4.32. Efecto de variar la anchura EBG.....	65
Figura 4.33. Efecto de variar la altura EBG.	66
Figura 4.34. Pérdidas de inserción con las dos bandas de frecuencia propuestas.	66
Figura 4.35. Diagrama de dispersión del filtro propuesto.	67
Figura 4.36. Modelo EBG para obtener un filtro en bandas 3.5 GHz, 5.5 GHz y 7.5 GHz.	68
Figura 4.37. Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión.	68
Figura 4.38. Efecto de variar la abertura.	69
Figura 4.39. Efecto de variar la altura de la celda EBG.	69
Figura 4.40. Efecto de variar la anchura de la celda EBG.....	70
Figura 4.41. Efecto de variar la posición de la abertura.	70
Figura 4.42. Efecto de variar el radio.	71
Figura 4.43. Efecto de variar el radio según su posición en el eje Y.	71
Figura 4.44. Efecto de variar el radio según su posición en el eje X.	72
Figura 4.45. Pérdidas de inserción con las tres bandas de frecuencia propuestas.	72
Figura 5.1 Comparación entre una celda EBG de una banda simulada y otra fabricada	75
Figura 5.2 Comparación entre una celda EBG de dos bandas simulada y otra fabricada	76
Figura 5.3 Comparación entre una celda EBG de tres bandas simulada y otra fabricada	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Banda de frecuencias radar.....	5
Tabla 2.2 Bandas de frecuencia LTE.....	6
Tabla 4.1 Valores de frecuencia y profundidad para una celda con una abertura y con dos.	62
Tabla 5.1 Valores obtenido de las simulaciones de cada filtro	74
Tabla 5.2 Parámetros que nos permiten controlar determinadas bandas en cada filtro..	74

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Actualmente en la sociedad se usan una gran cantidad de bandas de frecuencias para distintos fines cada uno, como por ejemplo en radares, detección de objetos, distintos protocolos de Wifi y las frecuencias usadas por los operadores móviles que abarcan más de una banda determinada según la tecnología a usar.

Al existir tal cantidad de frecuencias en determinados espectros no es de sorprender que muchas veces exista interferencia entre bandas adyacentes (excepto que sean gubernamentales), empeorando por ejemplo, la calidad en la experiencia del usuario en el caso de bandas usadas para telefonía móvil.

En España se usa/usará momentáneamente la banda de los 700 MHz para redes 5G pero esta no es la principal, la principal está situada en la banda de los 3.5 GHz la cual coincide en el espectro con otras aplicaciones como por ejemplo la tecnología WiMax o pequeñas antenas Wifi que tienen una banda de operación a 3.5 GHz creando así posible interferencia entre ellas.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es conseguir filtrar/atenuar una o varias bandas de frecuencias y así mejorar el uso que se le da a las determinadas bandas principales o dicho de otra manera, evitar el degradado de la banda principal. Para ello usaremos una tecnología denominada EBG o Electronic Band Gap que nos ayudará a conseguir lo propuesto.

Para alcanzar este objetivo se partirá de un tipo o modelo básico de estructura EBG para analizar sus resultados y posteriormente realizar varias modificaciones con sus respectivas simulaciones. Con este análisis inicial se probarán distintas formas de estructuras para seguir estudiando los efectos y el funcionamiento de estos. Una vez hecho esto se intentará crear modelos EBG que nos permitan conseguir filtros de 1, 2 y 3 bandas,

Estos filtros se verán reflejados en las pérdidas por inserción (parámetro S_{21}) y se marcará como objetivo que tenga al menos un máximo de -10 dB de atenuación en la frecuencia central de la banda de rechazo y un ancho de banda lo más estrecho posible para resultar muy selectivo en frecuencia. Además de estos requisitos el tamaño de la estructura EBG también se considerará un factor importante, por lo tanto se intentará conseguir filtrar estas bandas con solo una celda EBG.

Respecto a las bandas que se buscan filtrar en este trabajo, estas serían las que se encuentren ubicadas cerca de los 3.5 GHz (3 GHz-4GHz), 5.5 GHz (5 GHz – 6GHz) y 7.5 GHz (7GHz – 8 GHz).

1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

Este documento está organizado de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Contiene la motivación, organización y objetivos de este trabajo fin de máster.
- Capítulo 2: Incluye el estado del arte haciendo mención sobre conceptos básicos de filtros, rango de frecuencias y sus usos, además de una introducción a las estructuras EBG.
- Capítulo 3: Se describen los métodos de análisis usados en este trabajo para caracterizar una estructura EBG, tales como el análisis con modelos de circuitos y el análisis usando diagramas de dispersión. Al final de este capítulo se hará un estudio de varios prototipos con los análisis mencionados.
- Capítulo 4: Se analizará las diferentes formas que puede tener una estructura EBG y el cómo caracterizar estas. Se elegirán y diseñarán 4 modelos/formas de celda unitaria EBG que nos permita obtener 1, 2 y 3 bandas de frecuencias que se han marcado como objetivo en este trabajo.
- Capítulo 5: Conclusiones obtenidas después de realizado el analisis y las simulaciones de cada tipo de estructura EBG utilizada finalmente. Terminando con unas líneas que hacen referencia a posibles trabajos futuros.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 CONCEPTO DE FILTRO

Un filtro eléctrico o filtro electrónico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase [1].

Dentro de las nociones en la respuesta de los filtros hay que 3 conceptos que resultan esenciales para comprender cada tipo de filtro:

- **Banda de paso:** Se refiere al rango de frecuencias que no sufren cambio alguno.
- **Banda de transición:** Se refiere al rango de frecuencias que permite una transición entre la banda de paso y la banda eliminada. Esta suele estar entre la banda de paso y la frecuencia de corte.
- **Banda eliminada:** Se refiere al rango de frecuencias que son atenuadas por el filtro.

2.2 TIPOS DE FILTROS

Se clasifican en los siguientes:

- **Filtro Paso Bajo:** Son todos aquellos que atenúan la señal de salida a partir de la frecuencia de corte. Es decir, que hasta la frecuencia de corte la señal no sufre ningún cambio.

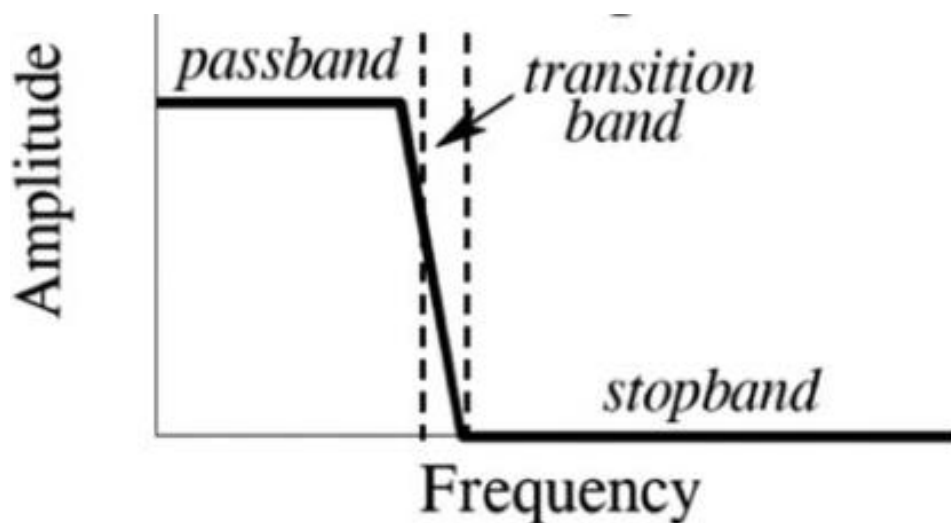


Figura 2.1 Respuesta de un filtro paso bajo [2].

- **Filtro Paso Alto:** Son todos aquellos que atenúan la señal de salida antes de la frecuencia de corte.

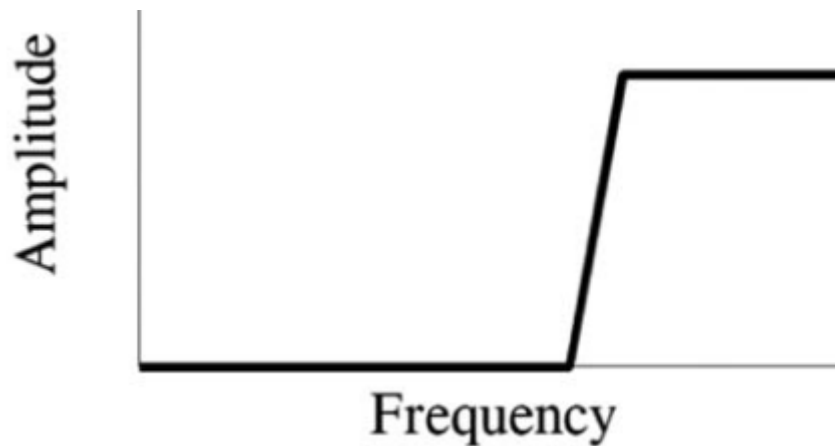


Figura 2.2 Respuesta de un filtro paso alto [2].

- **Filtro Paso Banda:** Son todos aquellos que atenúan la señal de salida antes y después de la frecuencia de corte, están suelen llamarse frecuencia inferior y superior.

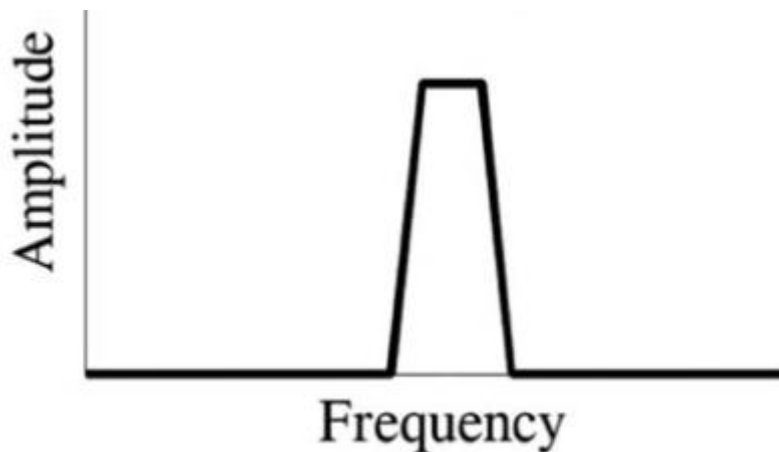


Figura 2.3 Respuesta de un filtro paso banda [2].

- **Filtro de Banda Eliminada, Filtro Notch o de rechazo de banda:** Son todos aquellos que atenúan la señal después de la frecuencia de corte inferior hasta la

frecuencia de corte superior. Es decir, la banda eliminada esta entre dos bandas de paso.

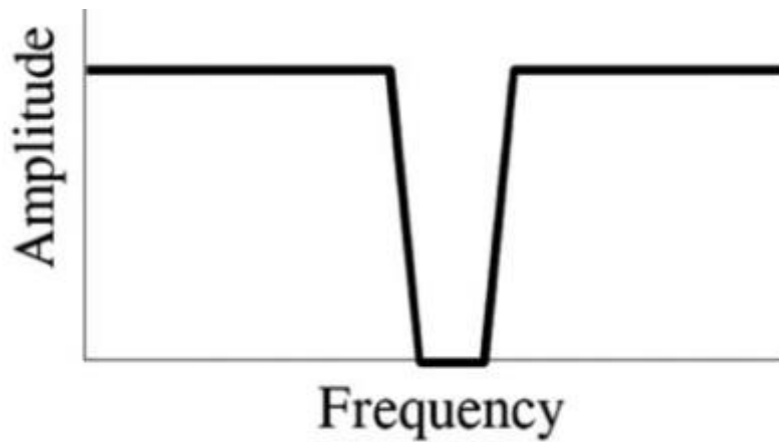


Figura 2.4 Respuesta de un filtro banda eliminada [2]

2.3 BANDAS DE FRECUENCIAS

Son intervalos de frecuencias del espectro electromagnético asignados a diferentes usos dentro de las radiocomunicaciones.

Por ejemplo el IEEE define la siguiente tabla para las frecuencias radar:

Banda	Rango de frecuencias
HF	3 – 30 MHz
VHF	30 – 300 MHz
UHF	300- 1000 MHz
L	1 – 2 GHz
S	2 – 4 GHz
C	4 – 8 GHz
X	8 – 12 GHz
Ku	12 - 18 GHz
K	18 – 27 GHz
Ka	27 – 40 GHz

Tabla 2.1 Banda de frecuencias radar

Para las comunicaciones móviles existe también una división tal como se muestra en la siguiente tabla solo para LTE o 4G:

Banda LTE	Frecuencia
20	800 MHz
32	1500 MHz
3	1800 MHz
7	2600 MHz

Tabla 2.2 Bandas de frecuencia LTE

Para 3G y 2G hay otras bandas con sus respectivos rangos de frecuencias. Para los nuevos despliegues de 5G se usa una banda de 700 MHz, pero la principal se encuentra situada alrededor de los 3.5 GHz.

Por último, las frecuencias inalámbricas también están divididas en frecuencias según su normativa 802.11. Las frecuencias comúnmente usadas son las de 3.5 GHz, 2.4 GHz (frecuencia para comunicaciones por bluetooth). Además, hay una tecnología denominada WiMax que permite llegar a ciertas zonas alejadas de los centros urbanos. Esta tecnología suele funcionar en torno a 2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5.8 GHz

2.4 ESTRUCTURA EBG

Las estructuras EBG o electronic band gap tienen como propiedad evitar la propagación de ondas electromagnéticas en un rango de frecuencia determinada independientemente de su ángulo de incidencia o permitir el paso de estas ondas en determinadas frecuencias, a estas frecuencias se les llama band gap y de allí el nombre de esta estructura.

Las estructuras EBG son usadas mayoritariamente como parte de dispositivos de microondas para mejorar su rendimiento en patrones de radiación y ganancia o disminuir las pérdidas en las transmisiones.

Una investigación inicial en este tipo de estructuras en frecuencias de microondas fue llevada a cabo en [3], donde se menciona a las estructuras EBG también con el nombre de Photonic Band Gap, debido a su estudio en el campo de la óptica, donde se estudiaba esta estructura en cristales sintetizados artificialmente y que podía ser usada para eliminar la emisión de fotones a cierta banda de frecuencia. Usaron la idea de capitalizar la condición de Bragg para construir materiales que bloquean toda la luz entrante de una longitud de onda particular (la condición de Bragg se cumple cuando los planos de un cristal están situados de tal manera que cada plano refleja un poco de la luz entrante) [4]. Este tipo de estructuras está dentro de las clasificadas como 3-D.

2.4.1 Tipos de estructuras EBG

Son unas estructuras artificiales y, generalmente periódicas. Esto puede realizarse a través de vías o perforaciones en el sustrato metálico o dieléctrico. Sobre la posición de la estructura están pueden estar abajo (plano de masa), arriba (encima del sustrato) junto a una línea de transmisión, arriba pero con la línea de transmisión suspendida, esto último normalmente utilizado cuando se usa estructuras EBG con antenas [5].

Las estructuras EBG pueden ser categorizadas como de una dimensión o 1-D, de dos dimensiones, planares o 2-D y de 3 dimensiones, volumétrica o 3-D.

a) Cristales EBG o estructuras 3-D

Este fue el punto de partida de las estructuras EBG, tienen periodicidad a lo largo de cada dimensión y permiten un band gap completo en una banda de frecuencia, es decir que no permite la propagación en ninguna dirección posible.

Pero estas estructuras tienen un inconveniente, y es que son difíciles de fabricar e integrar, lo que llevo al estudio de estructuras EBG en una o dos dimensiones menos ya que estan puede ser fabricadas en tecnología microstrip y por ende el coste es mucho menor. Además en estas dimensiones también se puede tener un control similar respecto a la propagación de ondas como en la estructura 3-D

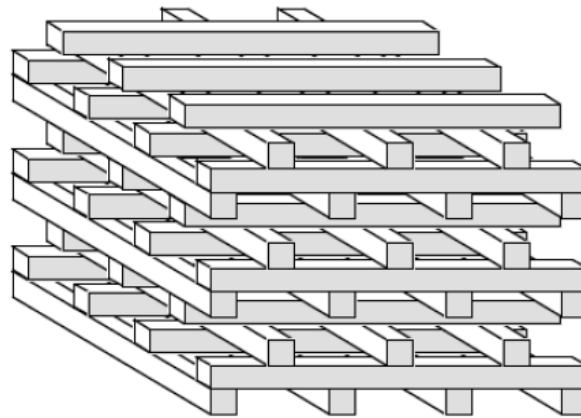


Figura 2.5. Estructura EBG de 3 dimensiones [6].

b) Planares o estructura 2-D

Si en la estructura 3-D se tenía periodicidad en las 3 dimensiones, en esta la tenemos en 2 y es homogénea en la restante o dicho de otra manera, se permite la propagación a lo largo de un eje, permitiendo que todas las variaciones sucedan en las otras dos dimensiones. La ventaja de esta estructura es su fácil fabricación y que permite unas dimensiones adecuadas para su uso en dispositivos de microondas.

Su implementación se puede realizar con tecnología microstrip y será esta estructura de dos dimensiones la elegida para desarrollar todas las pruebas que se realicen en este trabajo. Hay dos configuraciones típicas de este tipo de estructura que son la Mushroom EBG y la EBG plana, la diferencia entre estas dos radica principalmente en que la primera lleva una vía que atraviesa el sustrato y la segunda no.

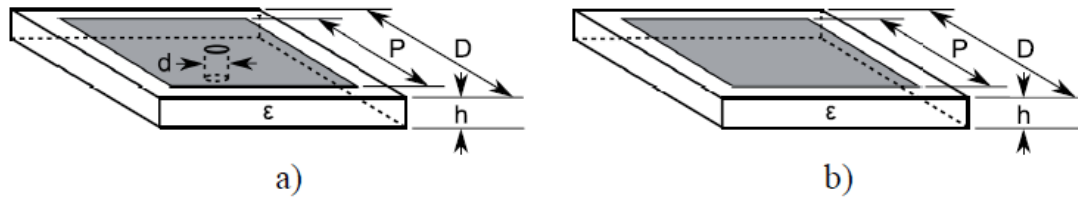


Figura 2.6. Estructura EBG de tipo mushroom u hongo (a) y estructura EBG planar (b).[7]

c) De una dimensión o 1-D

También puede ser implementado con tecnología microstrip. Las estructuras EBG 1-D tienen periodicidad de dos medios diferentes a lo largo de una sola dirección. Estos cristales básicos exhiben tres fenómenos importantes: band gaps fotónicos, modos localizados y estados de superficie. Sin embargo, como el contraste del índice es sólo a lo largo de una dirección, el band gap y los estados límite se limitan a esa dirección. Sin embargo, estas estructuras simples muestran la mayoría de las características de los cristales EBG de 2 y 3 dimensiones [4].

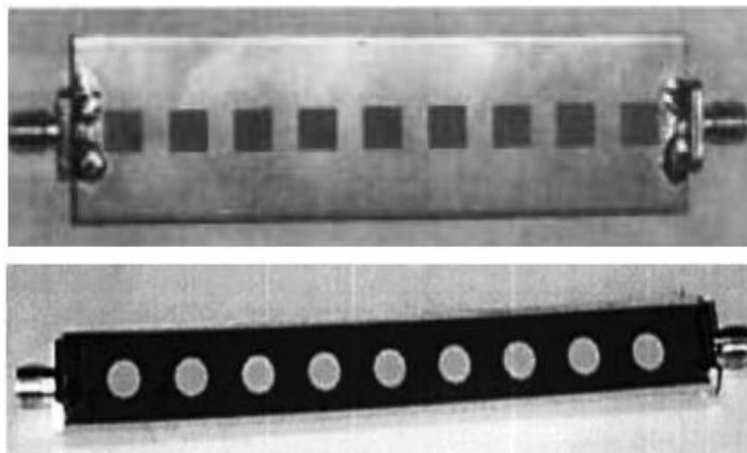


Figura 2.7. Dos configuraciones de una estructura EBG de una dimensión [8].

2.4.2 Aplicaciones de estructuras EBG para uso en antenas

Actualmente ya hay varios estudios con antenas donde se usa la tecnología EBG, por ejemplo en las antenas dipolos [9-10], antenas de parche [11-12-13], antenas de superestructura [14-15] y antenas de reflector parabólico [16], por tanto su aplicación en este ámbito ha tenido bastante diversidad, como se aprecia leyendo cada documento citado.

Esta demostrado como se resalta en los estudios anteriores que las estructuras EBG ayudan a las antenas planares a reducir el efecto de las ondas de superficie que muchas veces en vez de propagarse por el espacio libre, se propagan a través del plano de masa de la estructura planar. Esto afecta a propiedades de la antena como son la ganancia y la eficiencia, la banda prohibida de EBG ayuda a eliminar muchas veces este problema. Las

estructuras EBG también son capaces de proporcionar un rendimiento de frecuencia relativamente de banda ancha.

2.4.3 Aplicaciones de estructuras EBG para filtros

Los filtros desempeñan un papel importante en muchas aplicaciones de microondas. En los últimos años aplicaciones emergentes han seguido desafiando a los diseñadores de filtros de microondas con estrictos requisitos simultáneos, como el alto rendimiento, el peso ligero, el bajo coste y miniaturización [17].

Dado que el espectro electromagnético es limitado y tiene que ser compartido, los filtros banda eliminada de pequeño tamaño con una respuesta en frecuencia estrecha y una alta selectividad se utilizan para confinar las señales dentro de los límites espectrales asignados y rechazar el ruido y las interferencias de los canales adyacentes. En función de los requisitos y las especificaciones, los filtros pueden diseñarse como elementos fijos o distribuidos [17].

El uso de circuitos EBG para aplicaciones de filtrado en la tecnología de microondas se ha propuesto de diferentes maneras como se puede ver en [18], [19],[20] y [21]. Por ejemplo en [19] se usa una estructura EBG de tipo planar conocida como UC-PBG y usada en más trabajos.

3 ANÁLISIS Y DISEÑO

En este capítulo se mencionarán principalmente dos de los modelos de análisis que se usarán en este trabajo. Además se estudiarán las distintas posibles formas de una celda EBG y sus implicaciones.

3.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los análisis de las estructuras EBG se realizan mediante una serie de técnicas. Estas técnicas se aplican a la estructura unitaria de la estructura EBG mediante unas condiciones de contorno, entre los distintos tipos de análisis tenemos [22]:

- Modelado de circuitos agrupados LC o modelo circuital LC.
- Diagramas de dispersión eigenmode.
- Metodo de reflexión de fase.

De las cuales se procede a explicar las dos usadas en este trabajo.

3.1.1 Modelo circuital LC

El modelado circuital LC es el método más simple y rápido para el análisis de las estructuras EBG. Sin embargo este método no es exacto, ya que solo utiliza componentes de inductancia L y capacitancia C , siendo la unión paralela de estos componentes es conocida como tanque LC [22].

La estimación de la inductancia L como de la capacitancia C son controladas por la geometría de la celda unitaria de la estructura EBG. Los parámetros de una estructura EBG son las dimensiones de la celda, el espacio entre esta y la línea y la vía de la celda.

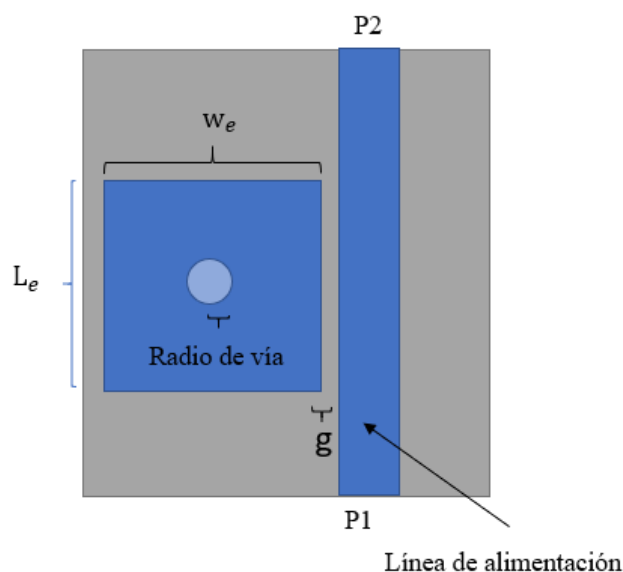


Figura 3.1 Parámetros de una estructura EBG tipo mushroom

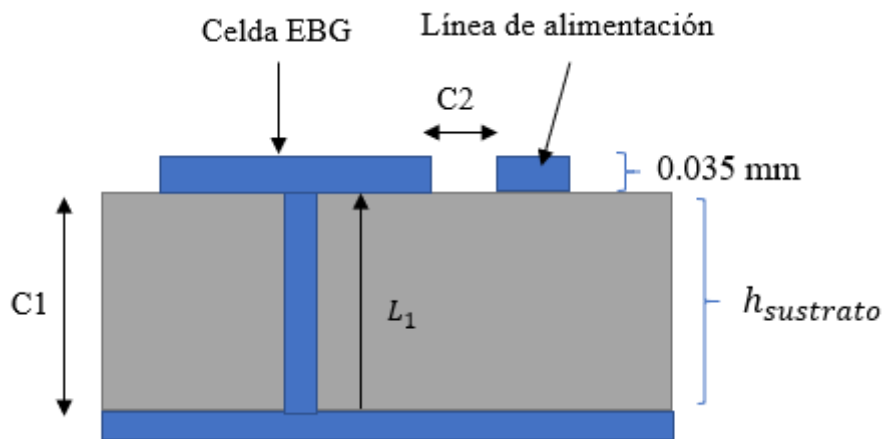


Figura 3.2 Identificación de parámetros para modelado LC

En la figura 3.2 se observa la equivalencia LC del circuito mostrado en la figura 3.1. Por ejemplo, la capacitancia $C2$ es debida a la separación o espaciado entre la línea de alimentación y la celda EBG, esta separación viene denotada por el parámetro g llamado ancho de la brecha (gap width) o dicho de otra manera, aparece debido a la diferencia de voltaje entre el borde de la celda EBG y la línea de alimentación.

La inductancia viene o se deriva del flujo de corriente a través de la vía, este valor depende de la altura y el radio de la vía. La capacitancia $C1$ es la cantidad de capacitancia que está relacionada con la diferencia de voltaje entre la celda EBG y el plano de masa debajo del sustrato, por tanto esta capacitancia se controla modificando las dimensiones de la celda.

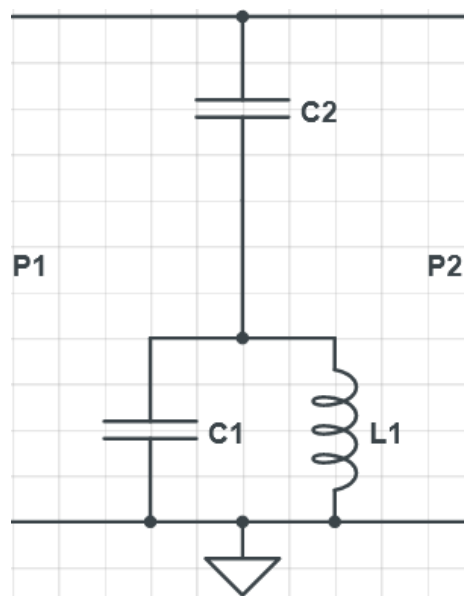


Figura 3.3 Modelo tank LC equivalente

La forma del modelo LC equivalente sería el mostrado en la figura 3.3 donde la línea superior horizontal refleja la línea de alimentación y la inferior el plano de masa. La celda EBG es representada por el tanque LC compuesto por L1 y C1.

La inductancia L1 viene representada por la siguiente fórmula [23]:

$$L_1 = 0.2 h_{sustrato} \left(\ln \left(\frac{2 h_{sustrato}}{radio} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

Obsérvese que debido a que la superficie del EBG está respaldada por un plano de tierra, este espesor, $h_{sustrato}$, es un parámetro de diseño crítico. Las fórmulas para los siguientes parámetros son [23][24]:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h_{sustrato}} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 (\epsilon_{eff} + 1)}{\pi} * L_e * \cosh^{-1} \left(\frac{L_e + g}{g} \right) \quad (3)$$

Por lo tanto la frecuencia de resonancia de la estructura EBG es:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1(C_1 + C_2)}} \quad (4)$$

La periodicidad de la estructura EBG viene definida determinada por $w_e + g$. La impedancia de superficie de la EBG, Z_s , viene determinado por [24]:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (5)$$

$$Z_s = \frac{j \omega L}{1 - \omega^2 LC} \quad (6)$$

Por último el ancho de banda sería aproximadamente [23]:

$$BW = \frac{1}{\eta} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$

3.1.2 Diagrama de dispersión

Los diagramas de dispersión muestran la relación entre los números de onda y la frecuencia. Estos diagramas presentan los modos de propagación y las bandas “gap” (banda donde la onda no se puede propagar) que pueden existir potencialmente entre dichos modos (en una estructura periódica a una frecuencia de funcionamiento determinada, pueden excitarse muchos modos en diferentes direcciones) [25].

Brillouin, en su teoría de la propagación de ondas en estructuras periódicas, afirma que para cualquier estructura periódica hay ciertos vectores (es decir, direcciones) en la celda unidad de la estructura periódica que constituyen una región límite llamada zona Brillouin irreducible. Según esta teoría, la derivación de los modos de propagación en la dirección de estos vectores es suficiente para cubrir todas las direcciones de propagación posibles dentro de la red. Por lo tanto, el problema de derivar los modos de propagación excitados a una determinada frecuencia se reduce a encontrar esos modos sólo en las direcciones de los vectores de la zona irreducible de Brillouin [25].

Para el tipo de estructura considera en la figura 3.1, el límite de la zona irreducible se ilustra en la figura 3.4 y consiste en los vectores que apuntan de Γ a X, de X a M, y de M a Γ . En este caso resulta conveniente porque nuestro estudio principal está centrado en una sola celda unidad, pero si se diera el caso de tener varias celdas en disposición de array, la zona de Brillouin irreducible sería igual a la que se analizará a continuación independientemente de cuantas repeticiones periódicas o forma tenga la estructura EBG.

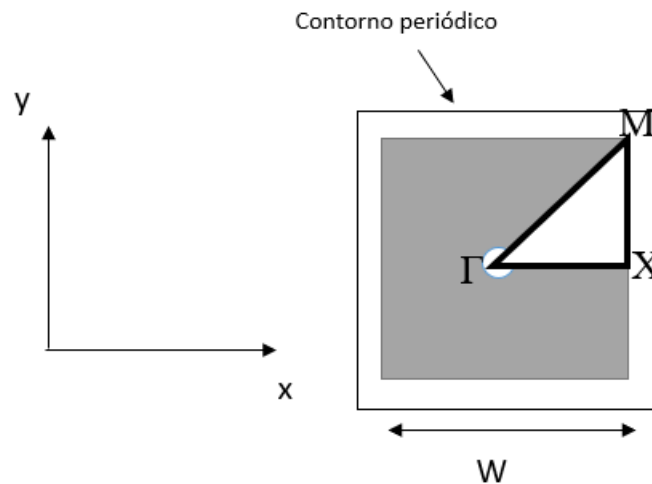


Figura 3.4. Celda unidad con su respectiva zona de Brillouin,

Por lo tanto, a la luz de la teoría de Brillouin, un diagrama de dispersión consistirá en tres regiones. La primera es aquella en la que sólo se considera la propagación en la dirección x . En esta dirección, el número de onda corresponderá a k_x , lo que a su vez se traduce en el desplazamiento de fase entre los dos lados de la celda unidad que se muestra en la figura 3.4 para una onda que se propaga en la dirección x . Esta traducción permite la derivación del diagrama de dispersión utilizando simuladores de onda completa en “eigenmode” tradicionales [25].

En estas simulaciones, la estructura de la celda unitaria y los desplazamientos de fase necesarios se introducen en el simulador, que calcula las frecuencias de propagación de las ondas que generarían esos desplazamientos de fase, más adelante se explicará cómo realizar esta simulación en la herramienta de simulación CST Studio.

Teniendo en cuenta que esta es una estructura EBG-2D y qué es el tipo a usar en este trabajo, solo se tendrán en cuenta dos fases correspondientes a los ejes “x” e “y”, si se quisiera tener en cuenta una tercera fase correspondiente al eje “z”, la estructura EBG tiene que ser 3D. Así, para una onda que se propaga en la dirección x sin variación y, la fase 1 varía entre 0 y 180° y la fase 2 se mantiene constante a cero, esto corresponde a la dirección Γ a X [25].

El vector X a M corresponde a la fase 1 constante e igual a 180° y la fase 2 varía de 0 a 180°. Esto representa la segunda región del diagrama de dispersión. La tercera región está representada por la dirección M a Γ en la que ambas fases son iguales y que cambia de 180° a cero. En el caso de la propagación de ondas en el espacio libre, al no haber dispersión, el diagrama consistirá en una línea recta en las regiones primera y tercera. En la segunda región la relación es cuadrática [25].

Utilizando una celda unitaria similar a la de la figura 3.4, las soluciones de los modos propios para las ecuaciones de Maxwell se determinan suponiendo unas condiciones límite eléctricas perfectas en los límites conductores (Vdd y placas de tierra en la dirección z) y condiciones límite periódicas en el plano xy. La constante de fase se varía a lo largo del triángulo reducido de Brillouin Γ -X-M, mientras se resuelve para los primeros N “eigenmode” [25].

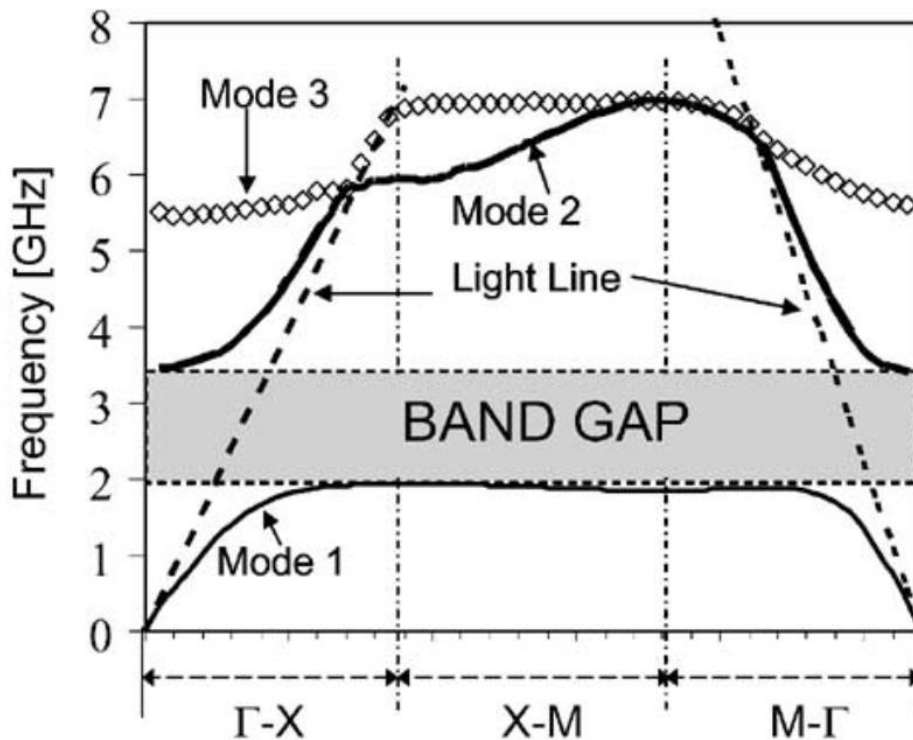


Figura 3.5. Diagrama de dispersión obtenido de la bibliografía [25].

Un posible resultado de cómo sería un diagrama de dispersión es el mostrado en la figura 3.5, donde entre el primer y el segundo modo puede observarse la banda gap característica de este tipo de estructuras. La estructura infinita no permite la propagación de las ondas, esta información es suficiente para derivar las características de la estructura EBG tales como la frecuencia central, las frecuencias de límite superior e inferior y el ancho de banda.

A continuación se explican los pasos para la creación de un proyecto y configuración del entorno de simulación para lograr simular un diagrama de dispersión usando el método de los “eigenmodes” dado por CST.

La versión usada es CST Studio 2018. Para crear el proyecto elegimos las opciones mostradas en la figura 3.10 y la figura 3.11, luego elegimos las opciones de configuración básica como la frecuencia, las unidades, diagrama de dispersión e eigenmodes.

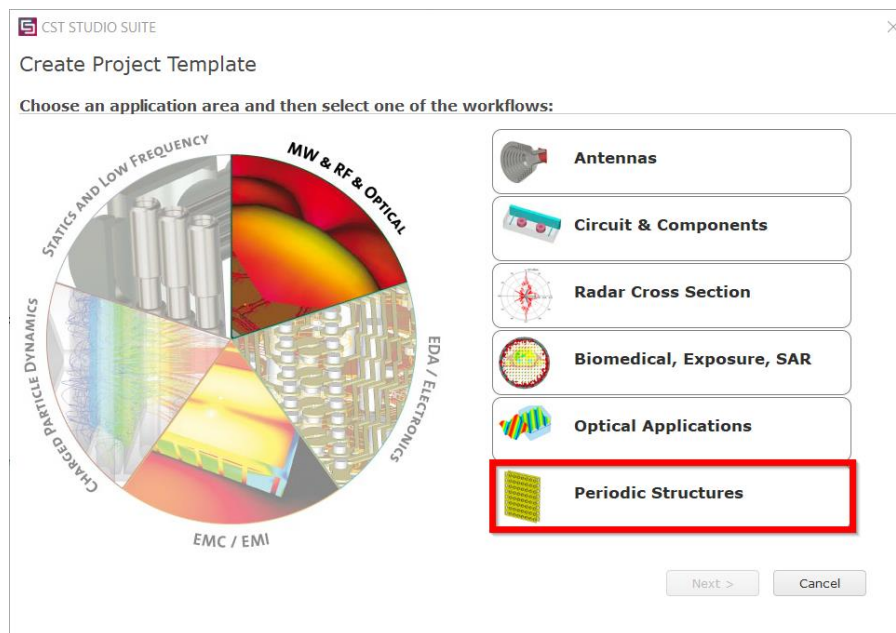


Figura 3.6. Configuración del entorno de simulación-primer paso.

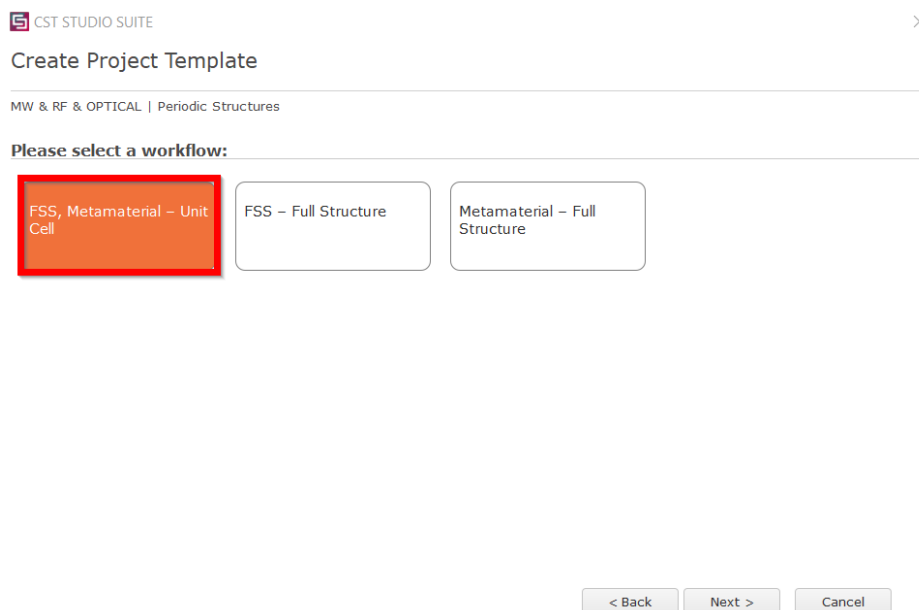


Figura 3.7. Configuración del entorno de simulación-segundo paso.

A continuación se procede a configurar el entorno según las recomendaciones teóricas vistas anteriormente. En la opción “boundaries” se pone todo el plano “x” en un contorno periódico y lo mismo para el plano “y”, dejando el plano Z como eléctrico.

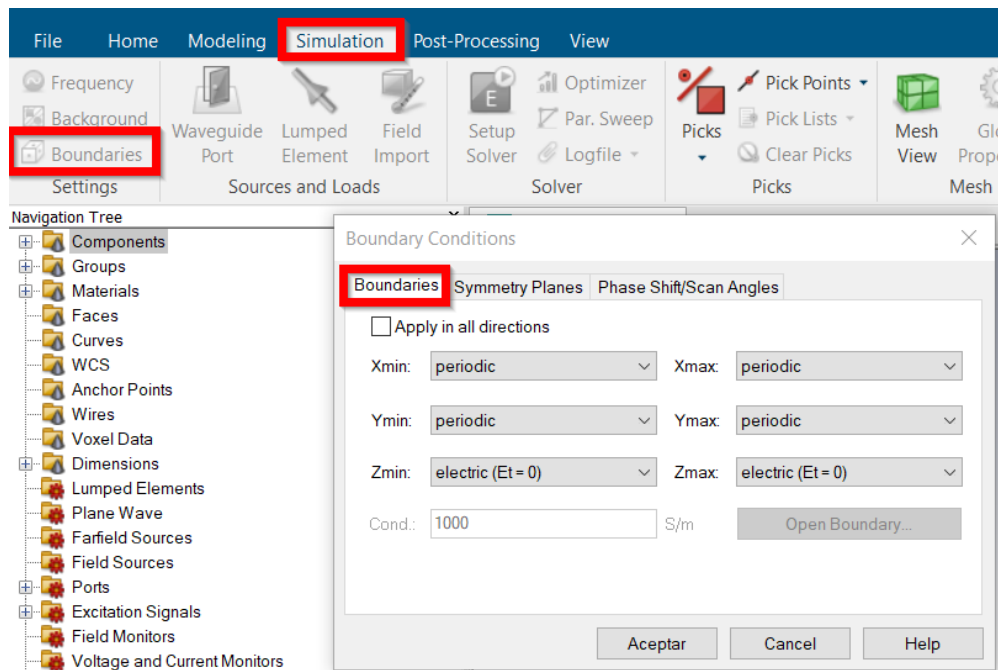


Figura 3.8. Configuración del entorno de simulación-tercer paso.

En lo que respecta a la opción “Symmetry Planes” solo tendremos disponible la opción del plano XY y la dejaremos con un valor de “none”. Para la opción “Phase Shift/Scan angles” se crean dos variables y se configura como muestra la figura X

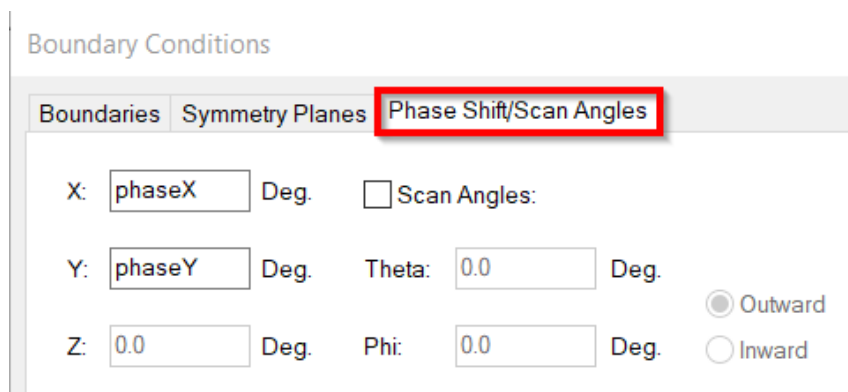


Figura 3.9. Configuración del entorno de simulación-cuarto paso.

Y se crean las siguientes variables en la lista de parámetros mostrados en la figura 3.10.

PathPara	= 2.9
phaseX	= Choose(Fix(PathPara)+1, PathPara*180, 180, 180-(PathPara-2)*180)
phaseY	= Choose(Fix(PathPara)+1, 0, (PathPara-1)*180, 180-(PathPara-2)*180)

Figura 3.10. Configuración del entorno de simulación-quinto paso.

Ahora hay que elegir la cantidad de frecuencias “eigenmodes” que queremos mostrar, para ello dentro de “post-processing” elegimos la opción “result templates”. Una vez

abierta la ventana elegimos “3D Eigenmode Result” tantas veces como frecuencias se deseen mostrar.

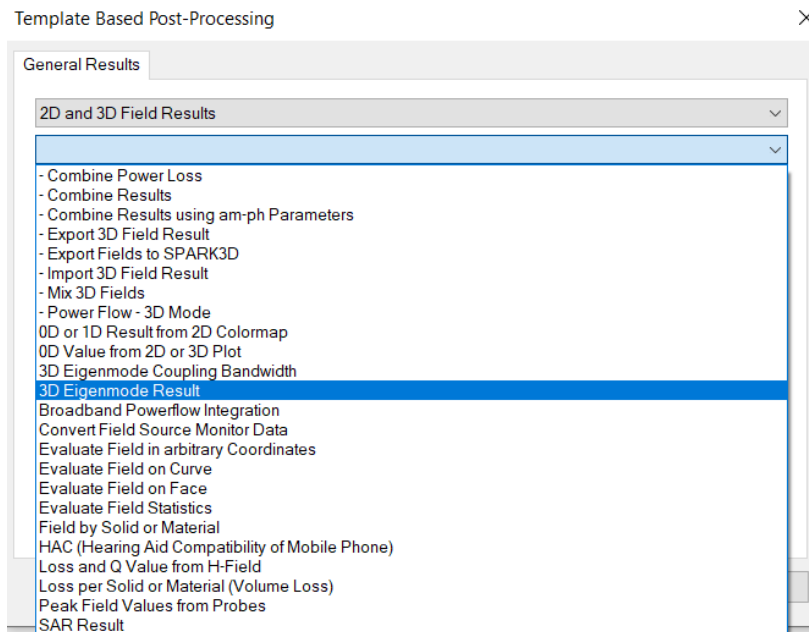


Figura 3.11. Configuración del entorno de simulación-sexto paso.

Hecho esto nos vamos a “Simulation”, elegimos la opción “Setup Solver” y dentro introducimos el número de modos que hayamos elegido previamente. Luego dentro de esta misma ventana escogemos la opción “Parameter Sweep” y la configuramos de la siguiente manera con el objetivo de ver los distintos valores de la fase en los dos planos de estudio y así obtener el diagrama de dispersión. Esto se muestra en la figura 3.12 y en la figura 3.13 a modo ejemplo de cómo quedaría una estructura básica EBG siguiendo estos pasos.

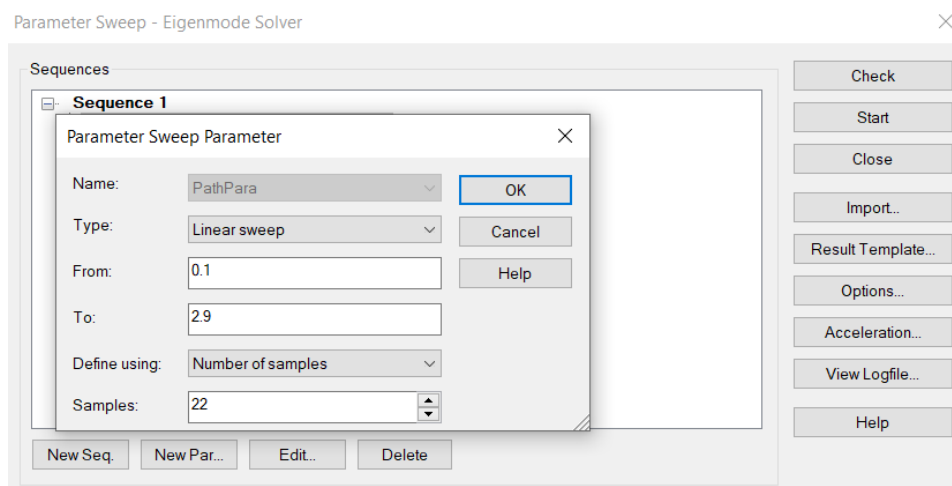


Figura 3.12. Configuración del entorno de simulación-séptimo paso.

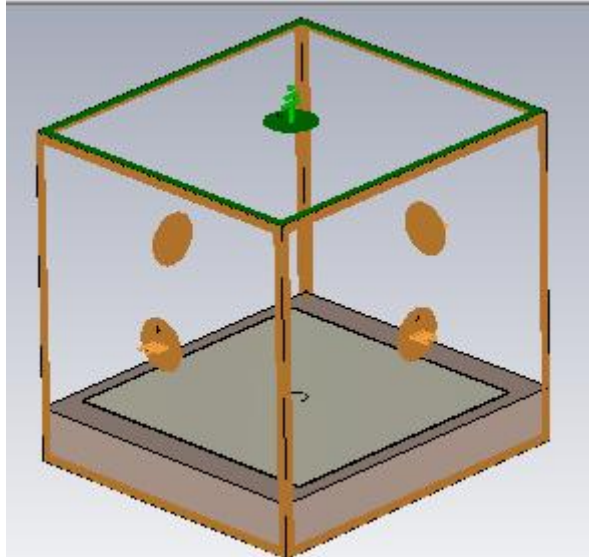


Figura 3.13. Configuración del entorno de simulación-octavo paso.

Y para poder ver los resultados hay que seleccionar a la vez los valores devueltos como se muestra en la siguiente figura.

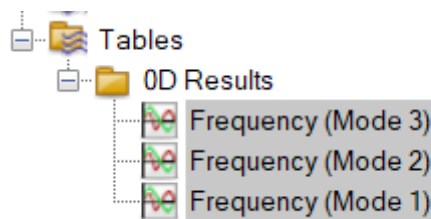


Figura 3.14. Configuración del entorno de simulación-noveno paso.

Esto sería lo necesario para la configuración de partida de la estructura que se quiera estudiar. Aunque como se indica en [26] hay que encontrar un valor adecuado a las condiciones de contorno que rodean a la estructura, para el caso de un EBG-2D, sería una altura adecuada (eje Z).

Para encontrar este valor, en [26] recomiendan realizar varias iteraciones y determinar así un valor de altura correcto, este valor está relacionado con el sustrato. En este trabajo después de varias simulaciones usaremos un valor de aproximadamente 7 veces la altura del sustrato, para ello se añadió una variable y así poder variar la altura en cada simulación. El valor de esto afecta a la precisión de la banda gap a diseñar que para más precisión necesita ir acompañado de un gráfico del parámetro S21.

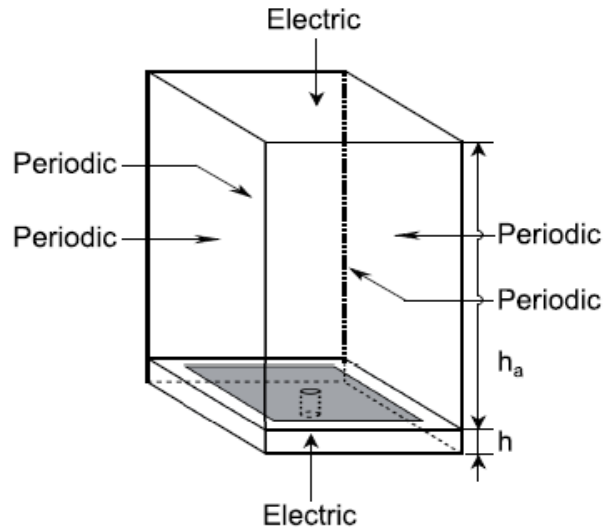


Figura 3.15. Dimensiones y configuración del contorno a simular para obtener un diagrama de dispersión [7].

3.2 ESTUDIO DE ESTRUCTURA EBG DE TIPO MUSHROOM

Para analizar las propiedades básicas de una estructura EBG vamos a crear y simular en la herramienta de simulación CST un modelo Mushroom estándar. A partir de él y los parámetros que lo caracterizan analizaremos los efectos en la banda de frecuencia de la estructura EBG (figura 3.16 y 3.17). Para este caso simularemos una estructura cuadrada por lo que con W es suficiente para definir las dimensiones de la celda unidad.

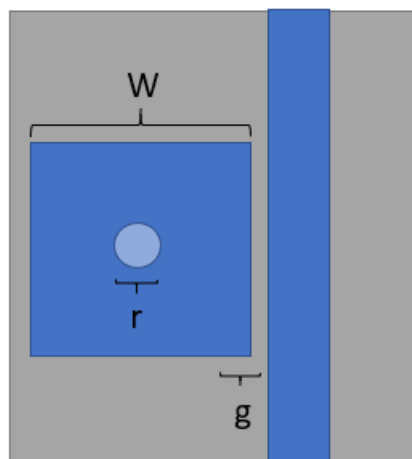


Figura 3.16. Estructura EBG desde una vista superior

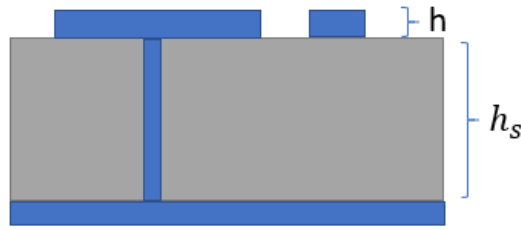


Figura 3.17. Estructura EBG desde una vista frontal

El ancho de la línea de transmisión es de 3.15 mm para conseguir una impedancia de entrada cercana a los 50 ohmios. W es la dimensión del parche cuadrado EBG y tiene un valor de 8 mm, g es el espacio que hay entre el parche EBG y la línea de transmisión y tiene un valor de 0.25 mm, r es el radio de la vía a insertar de valor 0.3 mm, h indica el espesor del parche y de la línea de transmisión con un valor de 1.524 mm. Para este estudio inicial se ha usado un sustrato Taconic RF-35 con un coeficiente eléctrico de pérdidas de 0.0025 (factor de pérdidas).

Para simular los puertos en CST se ha usado el macro que CST nos da para ello (figura 3.18).

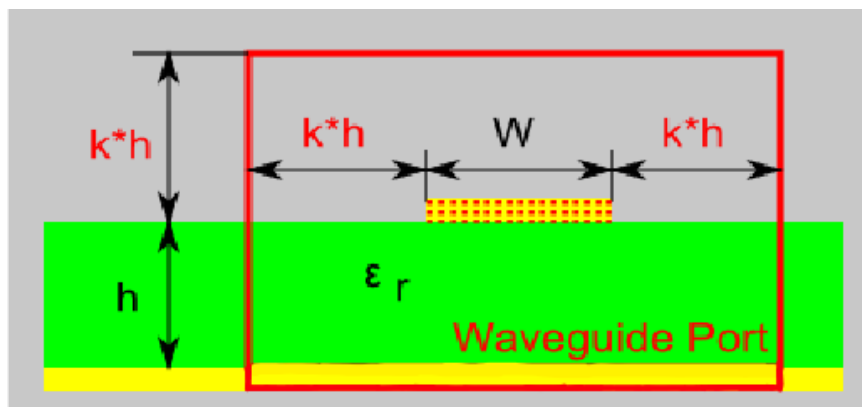


Figura 3.18. Configuración de los puertos usando la calculadora de CST Studio.

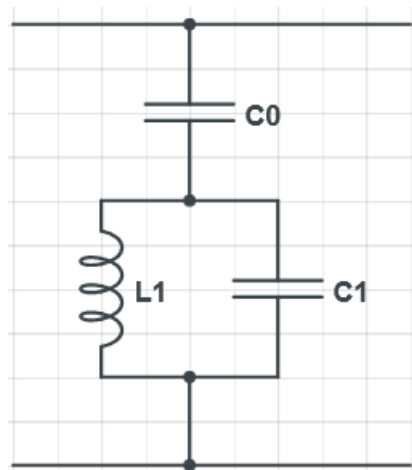


Figura 3.19. Diagrama de circuitos equivalente al simulado en CST Studio.

Hay que recalcar que esto es lo mismo visto previamente en el análisis de circuito del capítulo 3.1.1, en este se indicaba que para una celda EBG que tiene una vía esta se representa con un circuito LC tanque en paralelo como se aprecia en la figura 3.19. Por esta razón la capacitancia asociada al espaciado entre celda EBG y la línea de transmisión va en serie al circuito en paralelo.

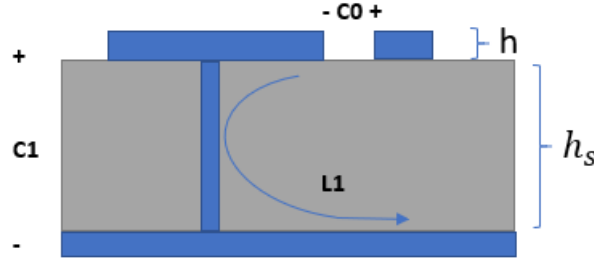


Figura 3.20. Vista frontal equivalente al modelo LC anterior

La capacitancia $C0$ indica que es generado por el gap o espacio vacío entre la línea de transmisión y el parche EBG, dicho de otra manera, el acoplamiento entre estos.

La capacitancia $C1$ aparece por la diferencia de potencial entre la cara de abajo (plano de tierra) y la cara superior (plano de estructuras EBG), este potencial depende del área del parche usado para la estructura EBG. Mientras la inductancia $L1$ es generada por el flujo de corriente a través de la vía. La frecuencia de resonancia del circuito viene dada por la ecuación 4.

Hasta ahora se ha elegido un tamaño estandar que se usará en todos los modelos y a partir de ellos ir cambiando los parámetros para comparar sus efectos. Pero si se quisiese elegir un determinado tamaño del parche EBG para conseguir una determinada frecuencia, se pueden usar las siguientes fórmulas [27]:

$$W = 0.14 \lambda_f \quad (8)$$

$$g = 0.03 \lambda_f \quad (9)$$

Donde λ_f es la longitud determinada a la frecuencia que se busca. Los cálculos del valor de $C0$ y $C1$ ya se mencionan en la ecuación 2 y 3.

A continuación los resultados de la simulación de esta estructura:

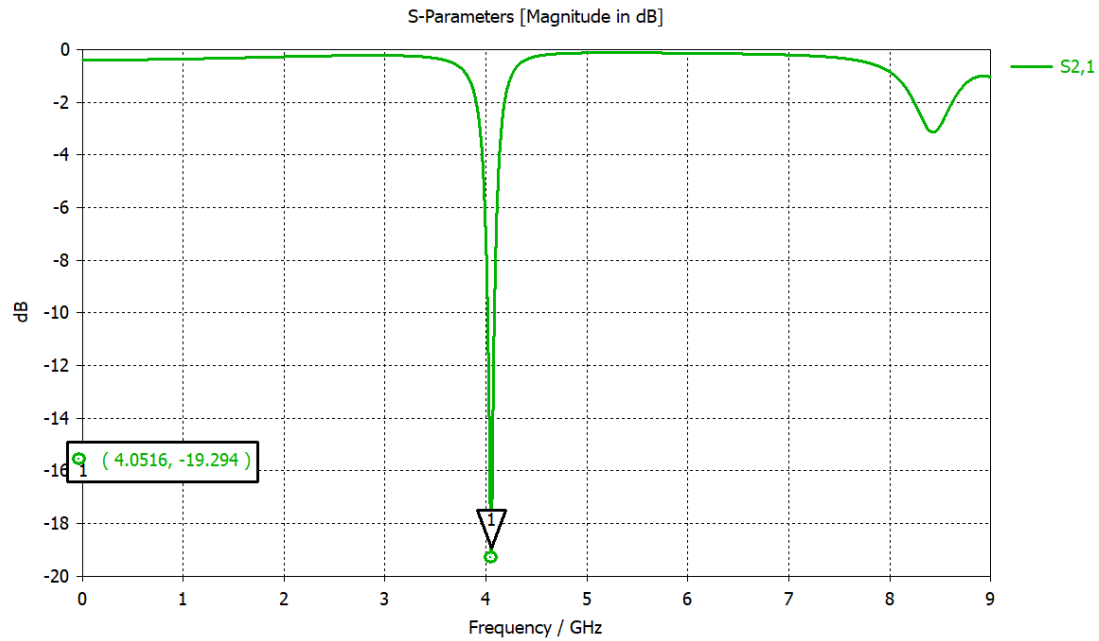


Figura 3.21. Parámetro S₂₁ de la celda unitaria básica tipo mushroom.

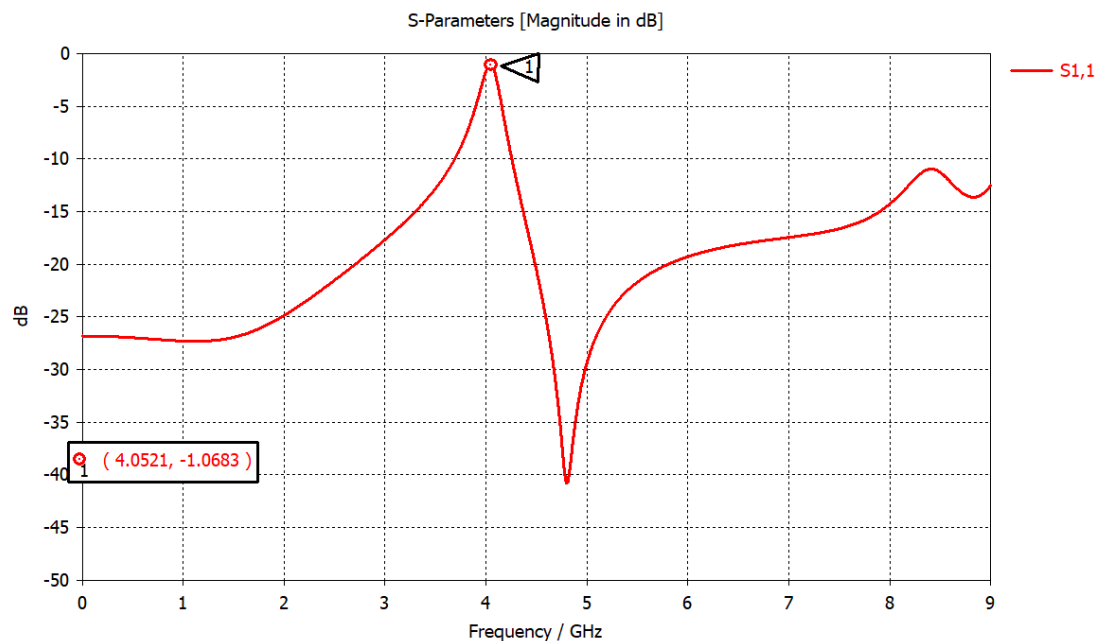


Figura 3.22. Parámetro S₁₁ de la celda unitaria básica tipo mushroom.

Se aprecia que con estos valores en los parámetros de la estructura EBG conseguimos eliminar una sola banda de frecuencia que se encuentran muy cerca de los 4 GHz vista en la gráfica del parámetro S₂₁ y que esta correlacionada con el parámetro S₁₁. Tiene una banda eliminada medida a -10 dB de 44 MHz de ancho de banda. A continuación modificaremos los valores de estos parámetros para ver los efectos en la banda a eliminar. Si modificamos el espaciado entre la línea de transmisión y la estructura EBG, es decir variando el parámetro g , obtenemos dos datos interesantes. La primera es que a medida que el valor de la separación aumenta, la frecuencia donde se encuentra la banda eliminada sufre un pequeño desplazamiento hacia frecuencias superiores.

La segunda es sobre la profundidad (el máximo de atenuación al que se puede llegar con el diseño) y el ancho de la banda eliminada. Y es que a medida que la separación o gap aumenta, el ancho de la banda se hace menor, lo cual también hay que tenerlo en cuenta a la hora de diseñar la estructura, esto se refleja en la gráfica 3.23. Este parámetro tiene repercusión en el ancho de la frecuencia a eliminar, es decir, el margen de frecuencias adyacentes a la frecuencia central que aceptaría el filtro. En este caso, a mayor valor de separación, el valor de este ancho medido a -10 dB disminuye (gráfica 3.24).

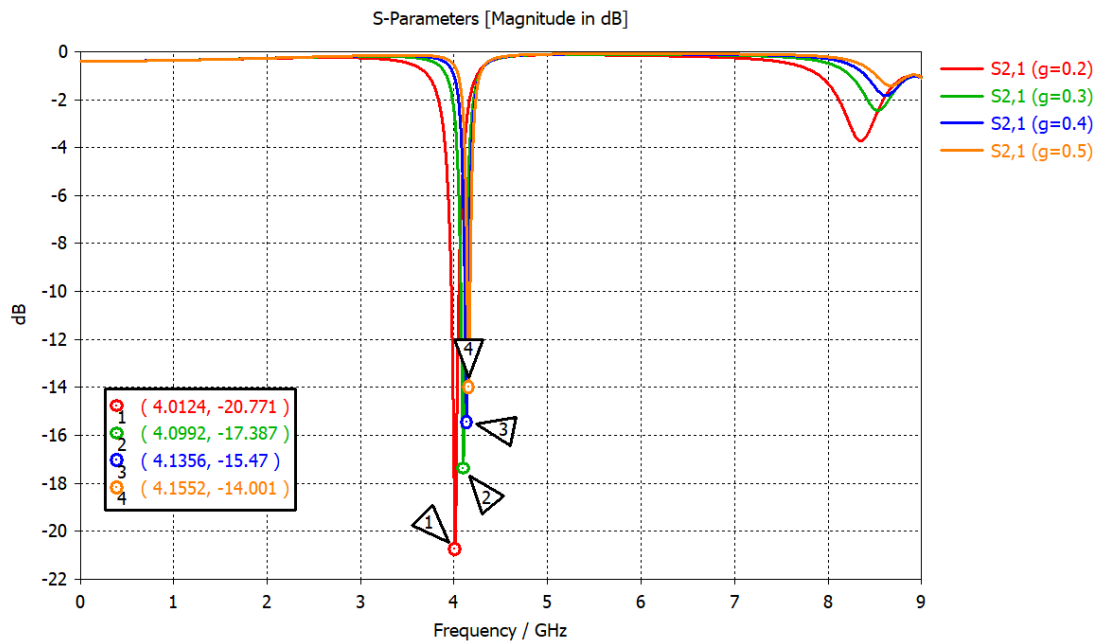


Figura 3.23. Parámetro S21 variando g(gap)

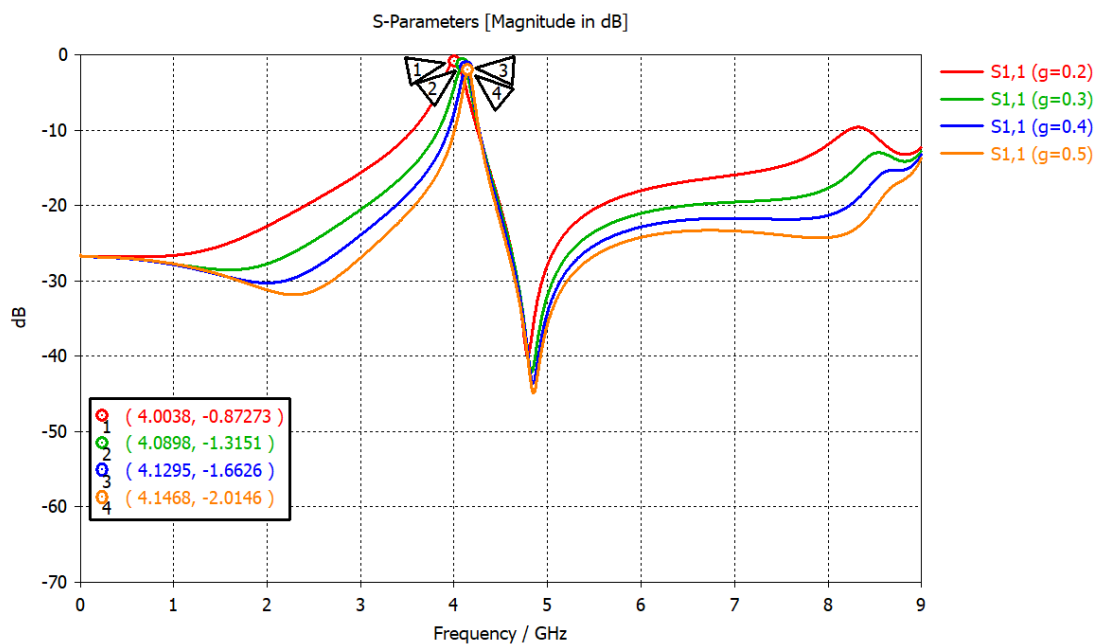


Figura 3.24. Parámetro S11 variando g(gap)

Si variamos las dimensiones del parche EBG (el cual se considera cuadrado en estas simulaciones de prueba), lo que tenemos es que a medida que la dimensión aumenta, la frecuencia de la banda eliminada sufre un desplazamiento hacia frecuencias inferiores. No tiene un efecto notable en el valor de atenuación de la estructura, aunque si se aprecia un efecto en el ancho de banda respecto a la frecuencia central y es que a medida que el valor de las dimensiones de la celda aumenta, el ancho de banda o el rango de frecuencias a eliminar medido a -10 dB se ve reducido.

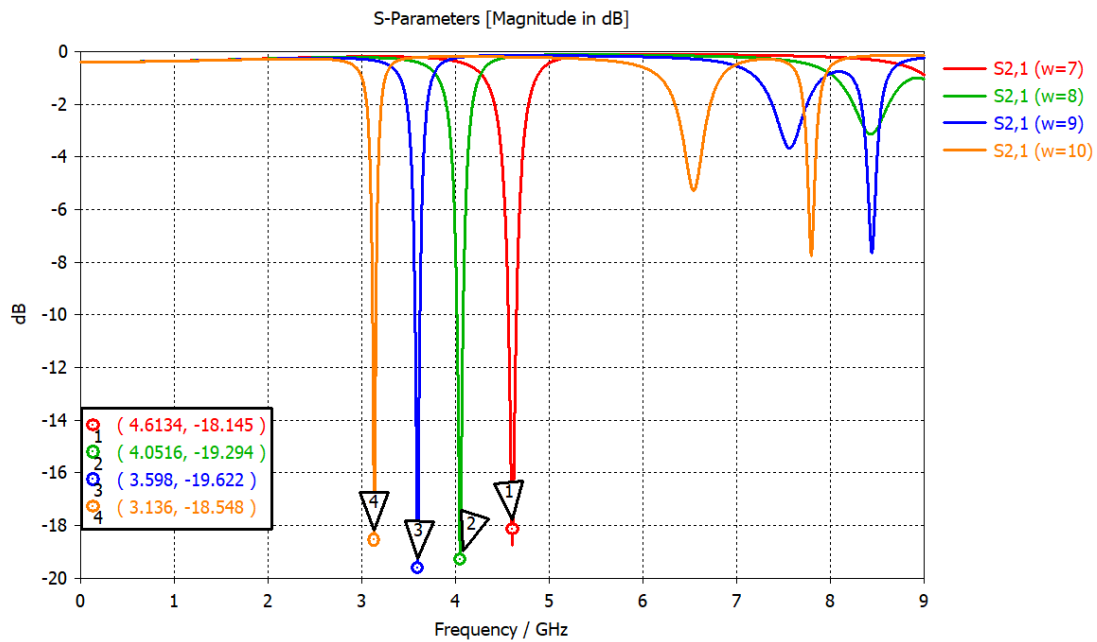


Figura 3.25. Parámetro S21 variando W(ancho).

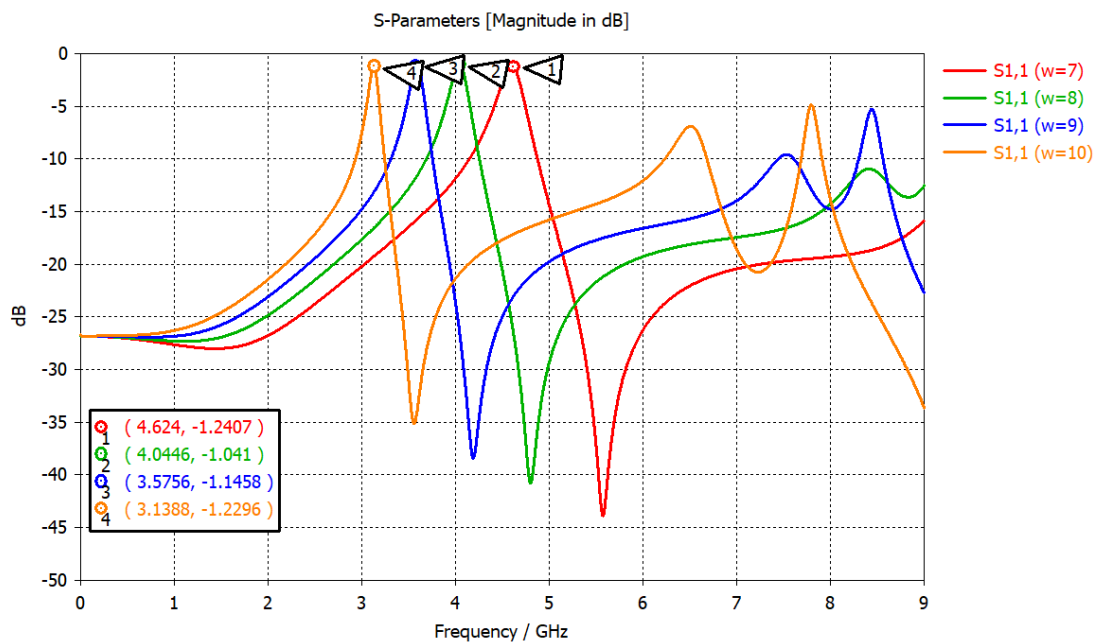


Figura 3.26. Parámetro S11 variando W(ancho).

Sobre el radio (figura 3.27 y 3.28), se aprecia que al aumentar el valor de este, la frecuencia de la banda eliminada sufre un desplazamiento hacia frecuencias mayores, este efecto se aprecia en la ecuación 1 donde a mayor radio el valor de la inductancia se hace menor, por lo tanto la frecuencia va aumentando. Sobre la atenuación, a medida que aumenta el valor del radio, se observa que este disminuye ligeramente.

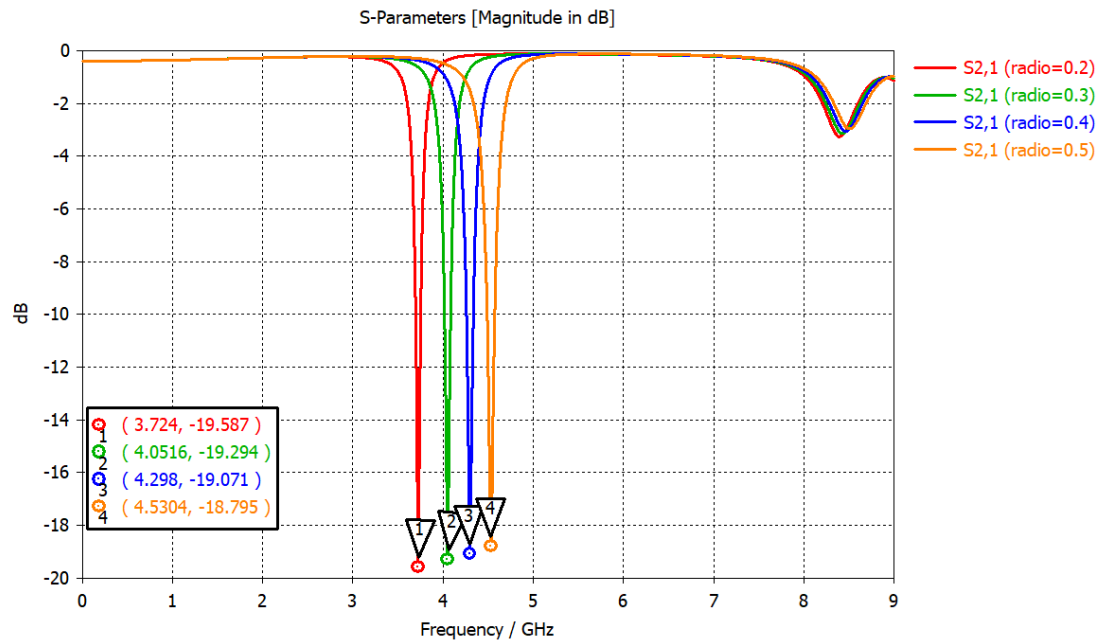


Figura 3.27. Parámetro S21 variando radio.

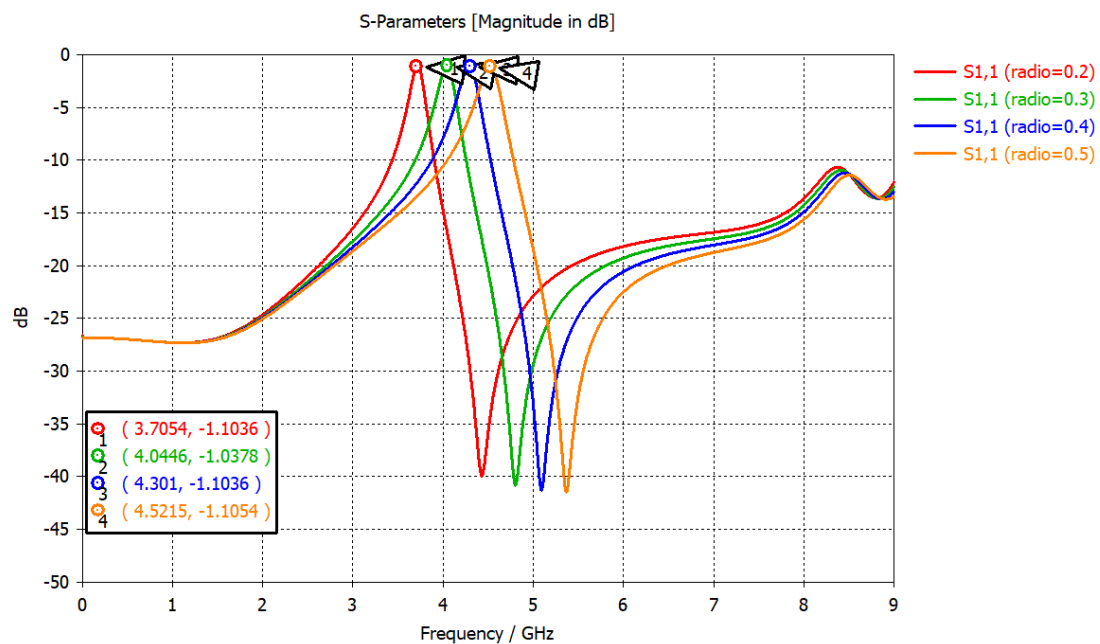


Figura 3.28. Parámetro S11 variando radio.

A continuación el siguiente parámetro sobre el cual realizar pruebas será el espesor del sustrato, en este caso de ejemplo los valores del espesor elegidos son aleatorios pero habría que tenerlo en cuenta para el diseño final, ya que cada sustrato comercial viene ya con unas medidas de espesor determinadas.

A mayor valor de espesor del sustrato vemos como la frecuencia de la banda eliminada sufre un desplazamiento hacia frecuencias inferiores y además se aprecia como la atenuación se acerca al límite de 10-dB impuestos en este trabajo como se aprecia en la figura 3.29.

Por tanto según lo apreciado en esta figura, valores mayores de espesor de sustrato nos dan un mayor porcentaje de potencia rechazada por el filtro, mejorando así la efectividad del filtro a la hora de rechazar determinadas bandas.

A nivel de ancho de banda también apreciamos un cambio notorio y es que a medida que aumenta el espesor, también lo hace el ancho de banda medido a -10 dB para la banda a eliminar.

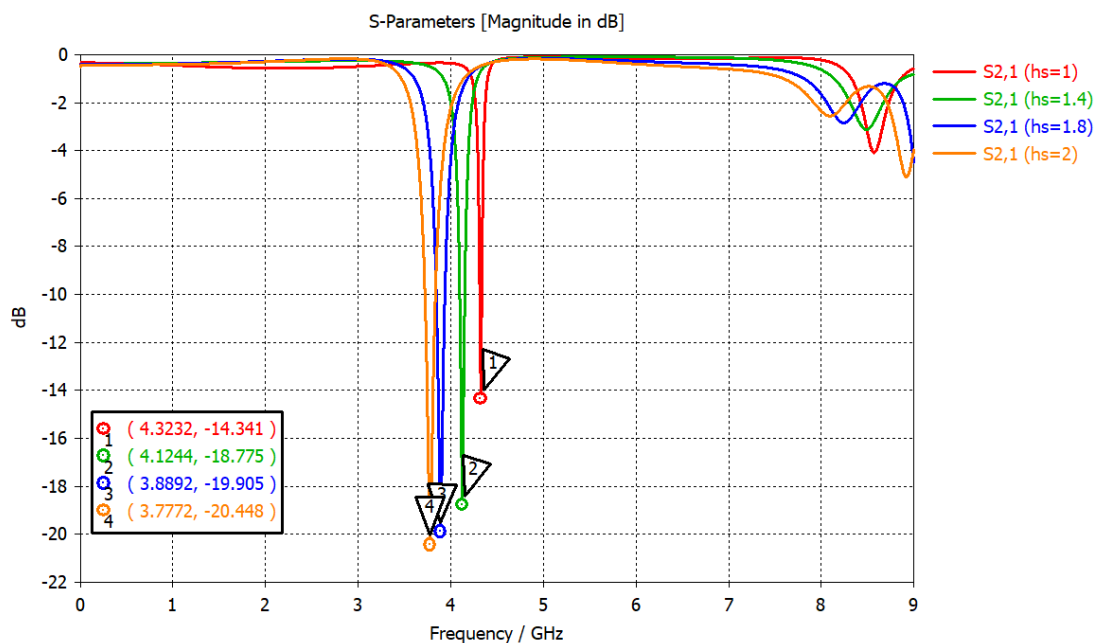


Figura 3.29. Parámetro S21 variando hs (espesor del sustrato).

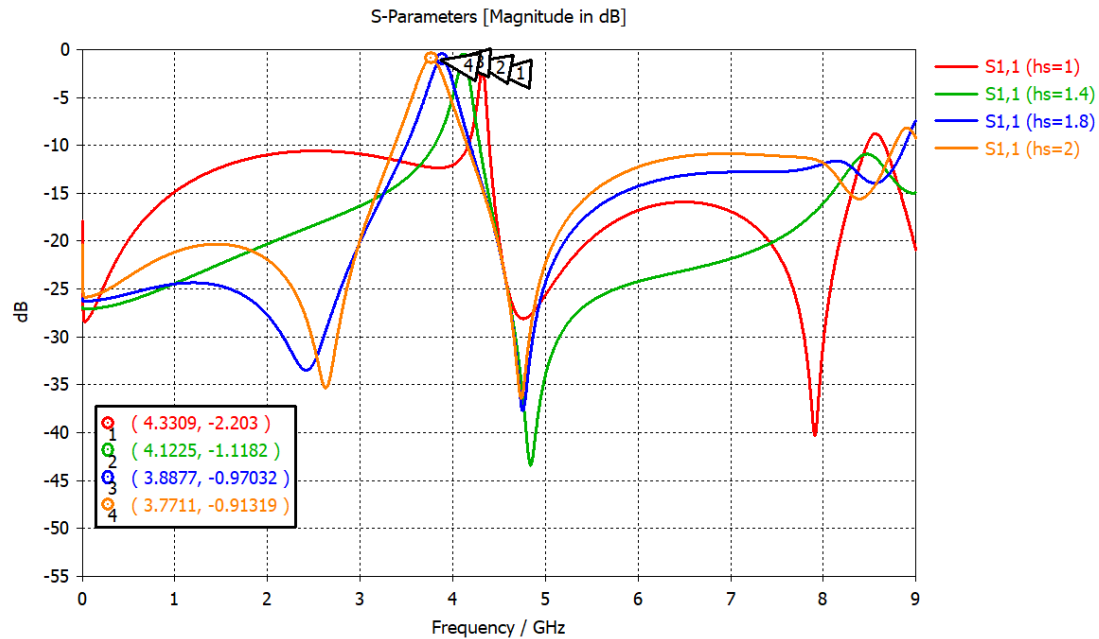


Figura 3.30. Parámetro S_{11} variando h_s (espesor del sustrato).

Luego como añadido, en la figura 3.31 se muestra que sucede si se mueve la posición de la vía en distintos ejes para ver también el efecto que tiene este sobre la banda de frecuencia a eliminar.

A nivel de desplazamiento de frecuencia y ancho de banda parece no existir un efecto notorio moviendo la vía en cualquiera de los ejes, de hecho parece simétrico respecto al centro.

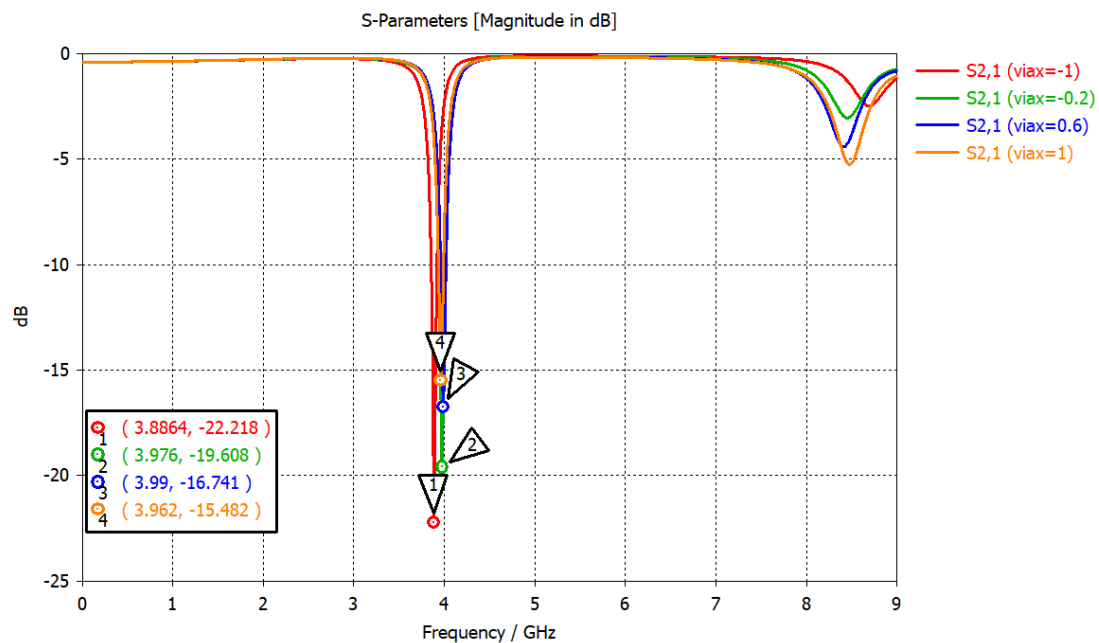


Figura 3.31. Parámetro S_{21} variando la posición Y de la vía.

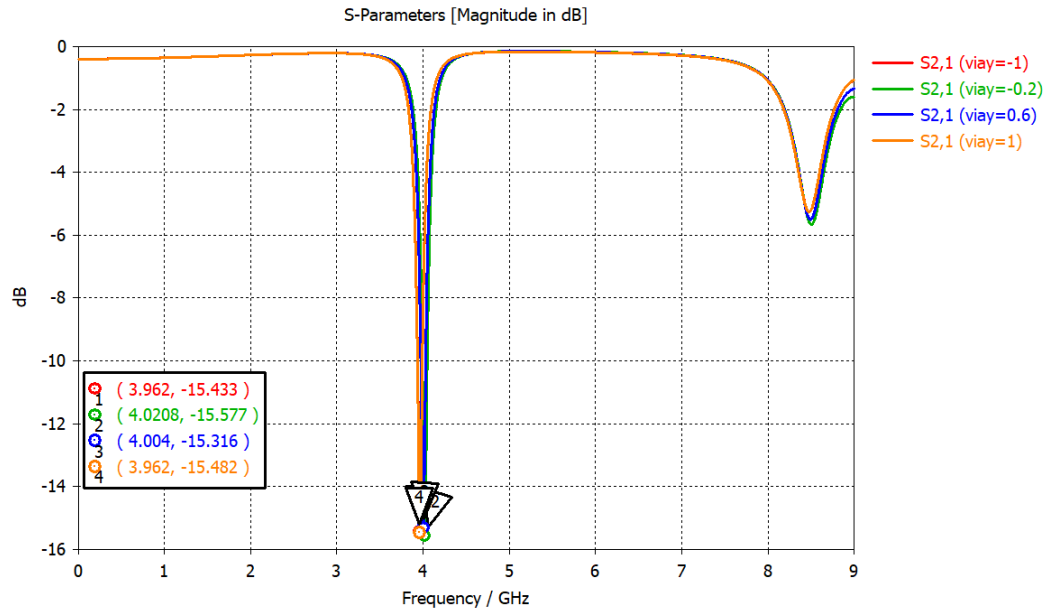


Figura 3.32. Parámetro S11 variando la posición Y de la vía.

Por tanto en líneas generales a la hora de diseñar una estructura EBG y a modo de resumen de diseño, las figuras 3.33 – 3.40 muestran una visión más sencilla del efecto de cada parámetro sobre la frecuencia y la profundidad respecto a las pérdidas por inserción vistas en los parámetros S21. Variar g no tiene un efecto muy notorio en lo que respecta a desplazamiento de frecuencia pero si es un valor determinante a la hora de elegir una banda eliminada. Como se aprecia en las figuras 3.33 y 3.34 a partir de 0.9 mm de separación los valores están por encima de -10 dB y ya no podríamos considerarlo como una posible banda de filtro a escoger. Respecto a las dimensiones del parche EBG si se aprecia una influencia notoria a la hora de desplazar frecuencias y esto nos permite fácilmente elegir un punto de partida en todo el abanico de frecuencias de 0 GHz hasta 10 GHz.

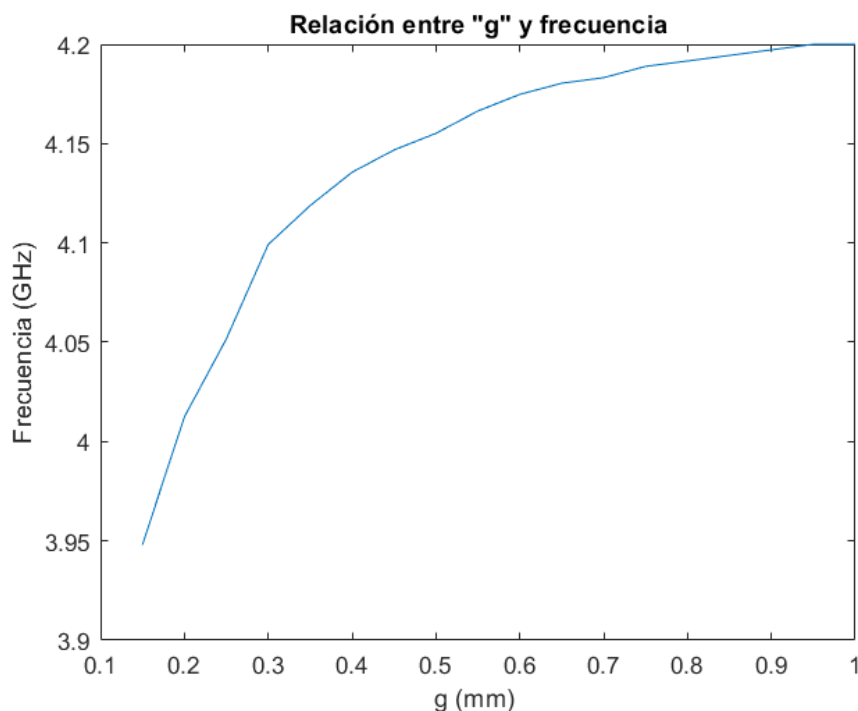


Figura 3.33. Relación entre el parámetro g y la frecuencia.

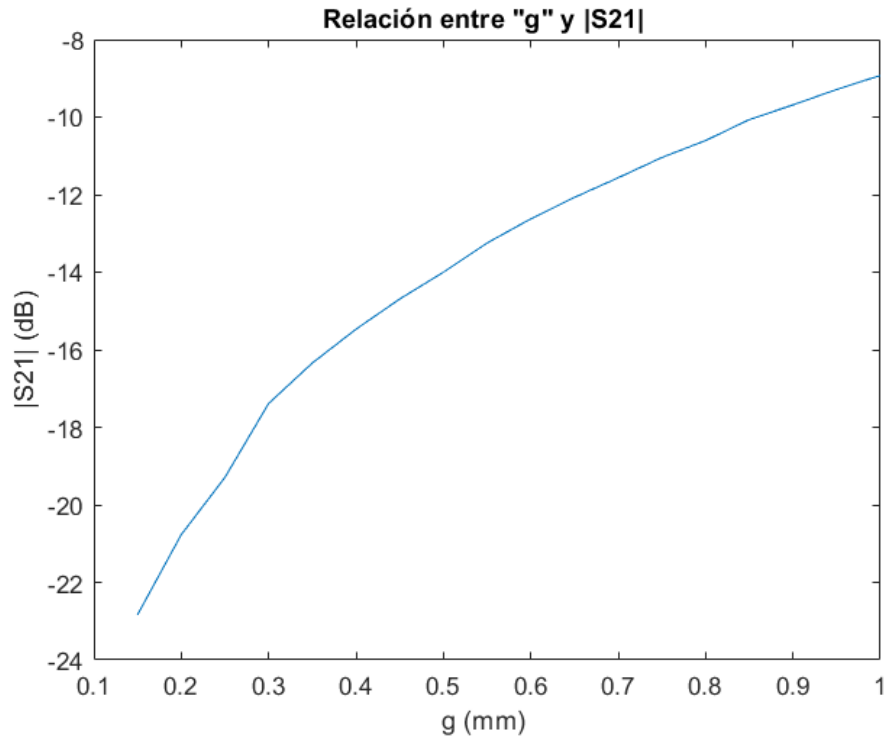


Figura 3.34.Relación entre el parámetro g y |S21|.

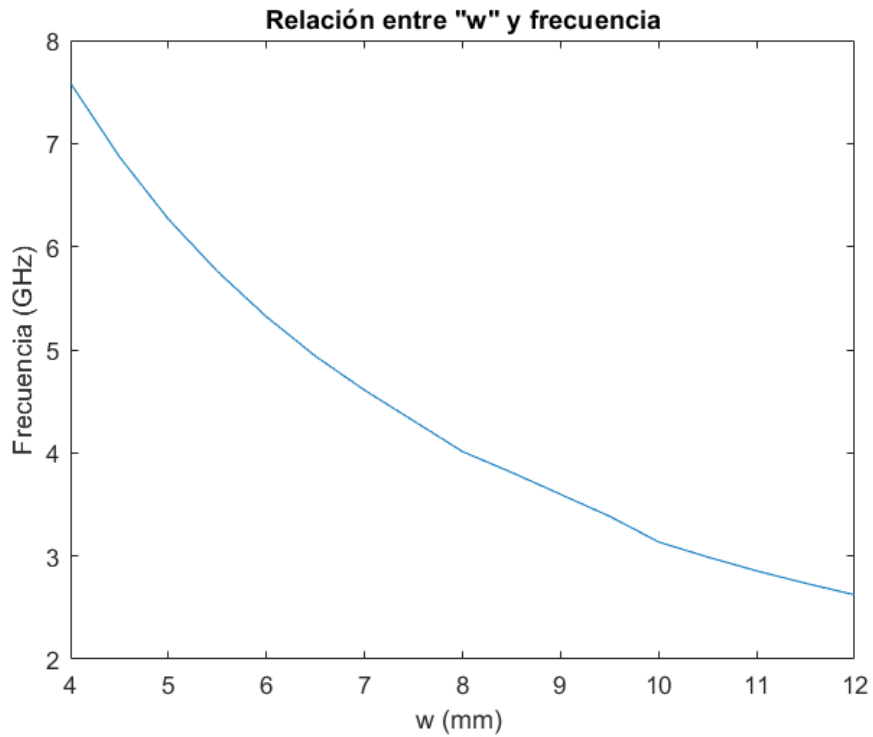


Figura 3.35.Relación entre el parámetro W y la frecuencia.

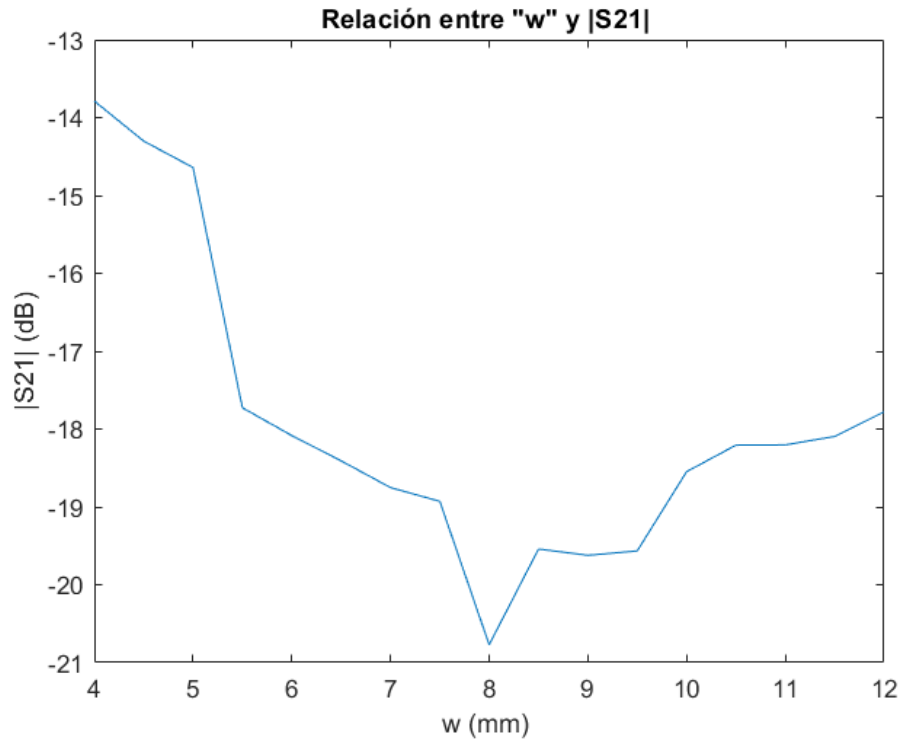


Figura 3.36. Relación entre el parámetro W y $|S_{21}|$.

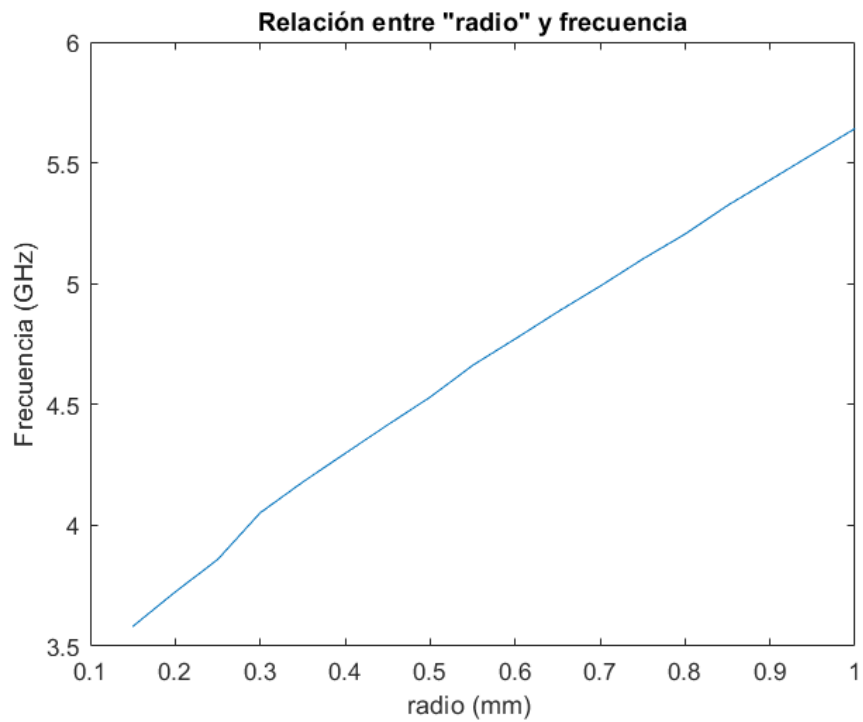


Figura 3.37. Relación entre el parámetro radio y la frecuencia.

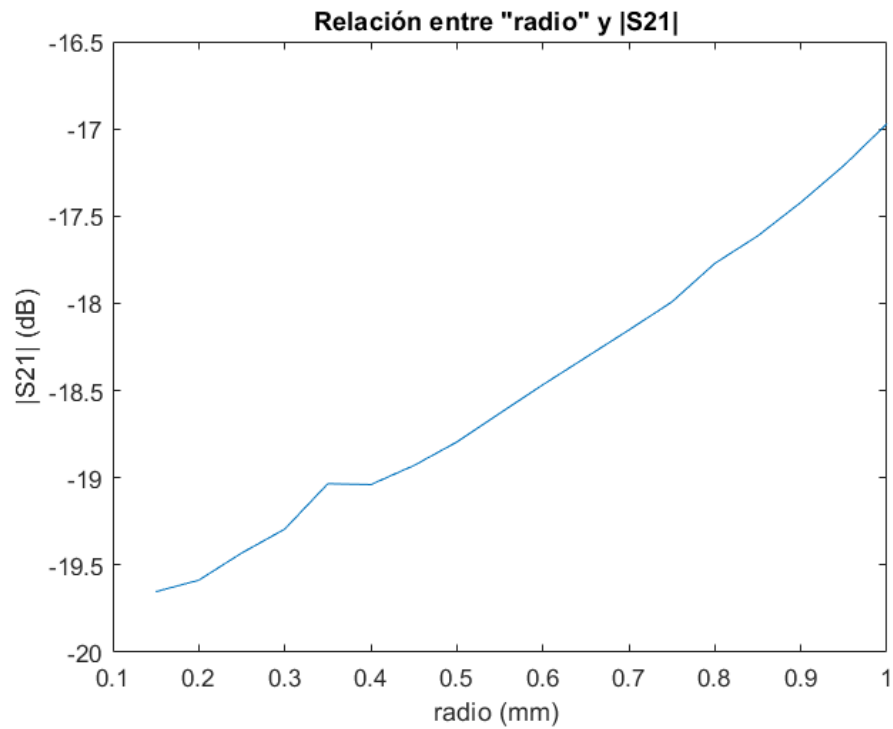


Figura 3.38.Relación entre el parámetro radio y |S21|.

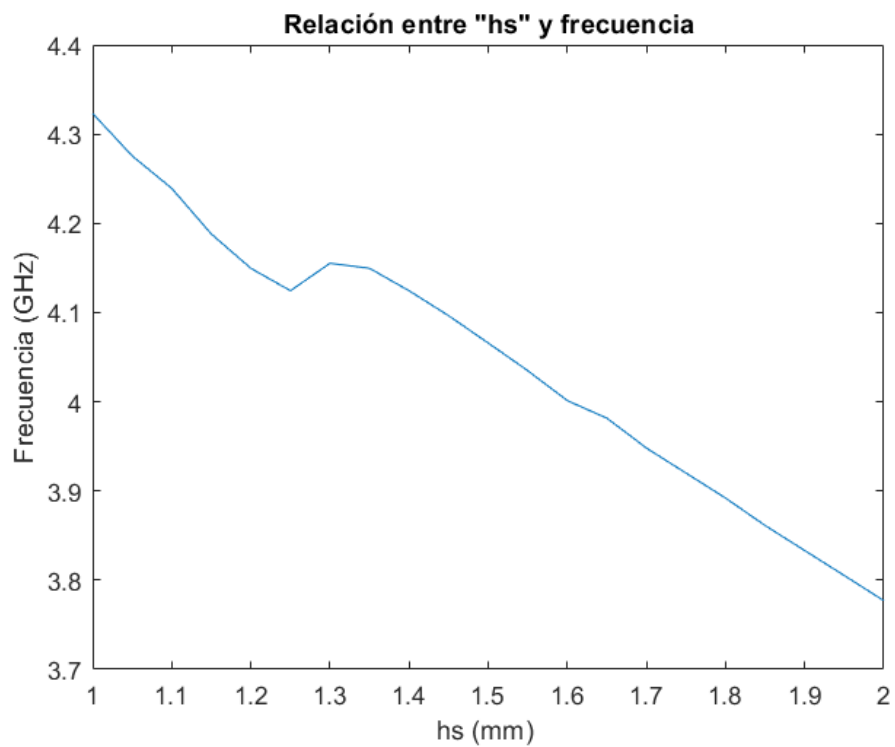


Figura 3.39. Relación entre el parámetro hs y la frecuencia.

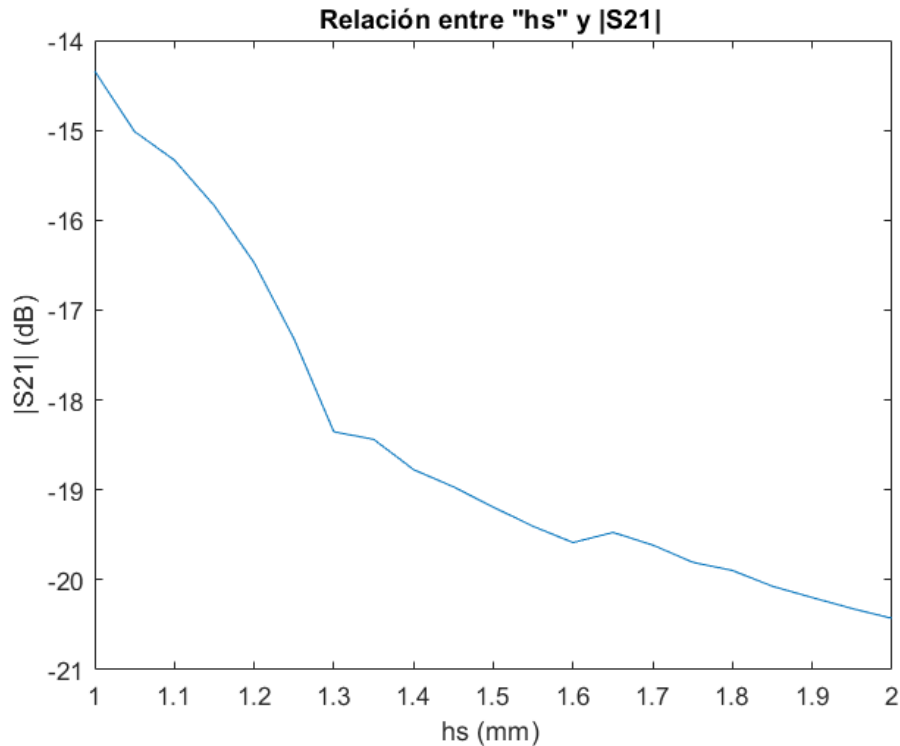


Figura 3.40. Relación entre el parámetro h_s y $|S_{21}|$.

Aunque todos estos resultados sean muy generales y estén condicionados por ejemplo a tener unas dimensiones específicas de estructura EBG, se deben tener en cuenta ya que aunque la frecuencia central cambiase debido a las dimensiones de tamaño de la estructura, el efecto de variar lo demás se mantendrá.

Es decir, variar g independientemente del tamaño de la estructura EBG siempre tendrá un crecimiento que se podría ver como secuencial en la frecuencia ya que esta aumenta 0.5 GHz, pero esto sucede hasta un valor de separación igual a 0.5 mm, a partir de allí, para valores superiores el efecto en la frecuencia prácticamente no se nota. En lo que respecta a la profundidad se puede afirmar que aumentar la separación en casi un valor extra de 1 mm crea que la profundidad medida en dB aumente casi unos 15 dB.

Lo mismo ocurre con el radio y la altura del sustrato elegido, aumentar el radio en casi 1 mm extra hará que la frecuencia aumente en casi 2.5 GHz pero esto tendrá un efecto muy suave en la profundidad, de casi unos 3 dB. Mientras que aumentar el espesor del sustrato en 1 mm extra tendrá un efecto en la frecuencia de casi 1 GHz (la reducirá), pero tiene un efecto muy interesante en la profundidad del parámetro S_{21} y es que a medida que este aumente la profundidad se hará mayor o dicho de otra manera, decrecerá unos 6 dB.

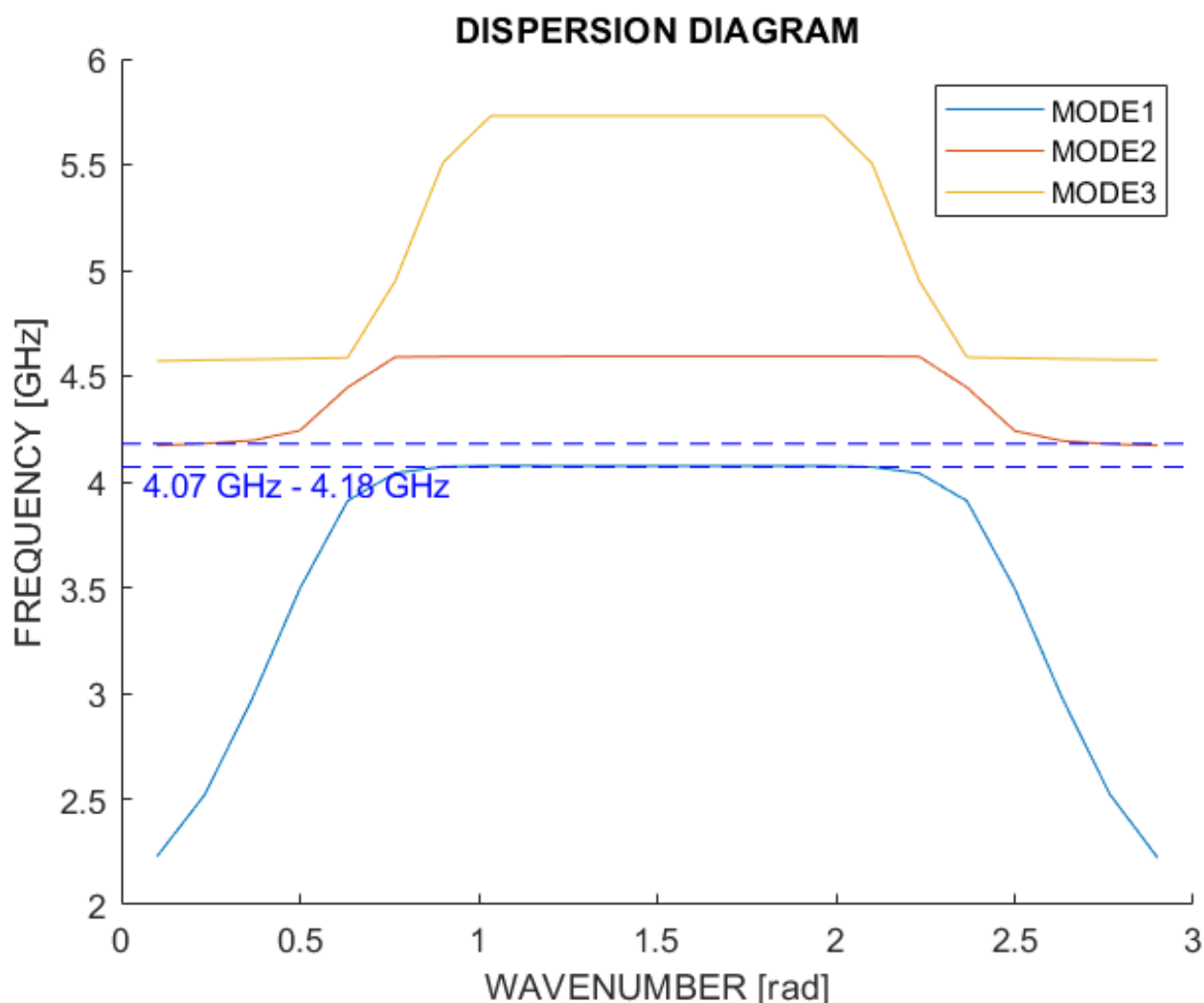


Figura 3.41. Diagrama de dispersión de la estructura EBG de tipo mushroom.

A nivel de diagrama de dispersión se aprecia en la figura 3.41 que hay una banda de frecuencias que va desde los 4.07 GHz a los 4.18 GHz que es muy parecida a la banda obtenida del parámetro S21 de la figura 3.21, por lo que los resultados concuerdan.

Hasta ahora hemos tenido en cuenta el cómo afecta a nuestra banda eliminada los parámetros que acompañan a una estructura EBG, a continuación se analizarán otras situaciones particulares como por ejemplo el efecto que tiene el sustrato sobre este tipo de estructuras.

Para el estudio del efecto de los sustratos se han tenido en cuenta otros dos más aparte del RF35 ya usado anteriormente, se ha elegido el G10 con una permitividad de 4.8 y el FR4 con una permitividad de 4.3 porque estos dos presentan un coeficiente de pérdidas de 0.025 parecido al Taconic RF-35 usado previamente.

Este breve estudio se muestra en la figura 3.42 donde se aprecia que un valor de permitividad baja nos permite tener mejores resultados en lo que respecta a profundidad. A valores altos de permitividad la frecuencia central de la estructura EBG se desplaza hacia frecuencias más bajas y a la vez pierde profundidad comparado con el valor del RF35. Es por este motivo que se ha decidido mostrar los resultados finales usando este sustrato.

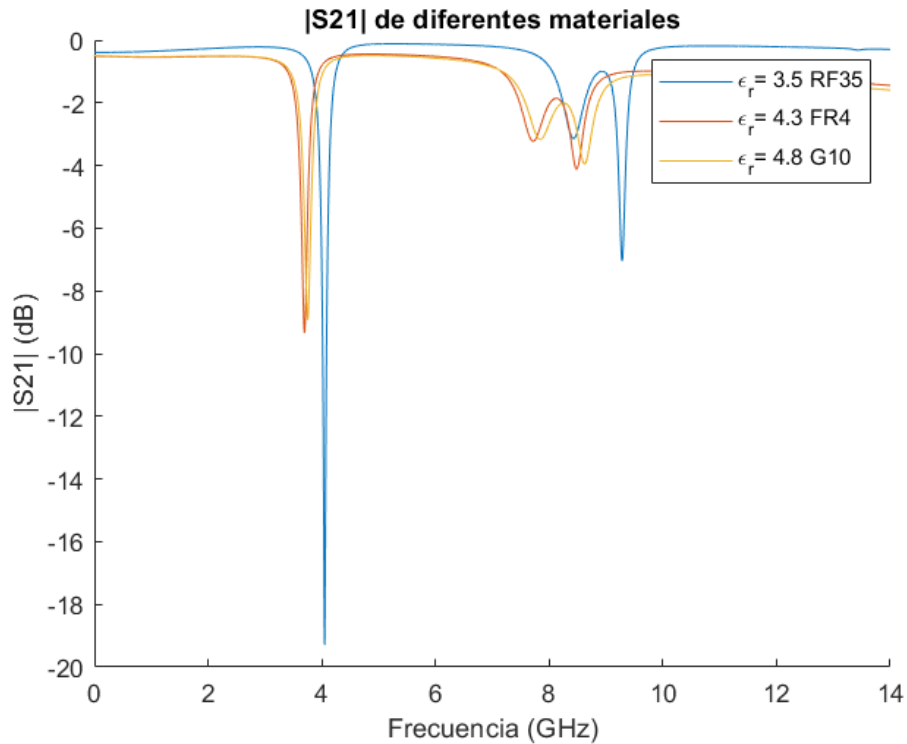


Figura 3.42. Parámetro S21 respecto a varios tipos de sustratos.

3.2.1 EBG Planar

La estructura EBG está compuesta principalmente por un plano de masa, un sustrato, un array periódico de parches en la parte superior. Lo que diferencia a una estructura EBG de tipo hongo o mushroom de una de tipo planar es la vía, la de tipo planar no la lleva. Esta diferencia se aprecia en la figura 3.43 donde a la izquierda tenemos una estructura EBG de tipo mushroom y a la derecha una de tipo planar.

Se ha creado un modelo planar en CST igual en dimensiones a la estructura de tipo mushroom vista hasta ahora y se ha calculado sus pérdidas de inserción como se aprecia en la figura 3.44.

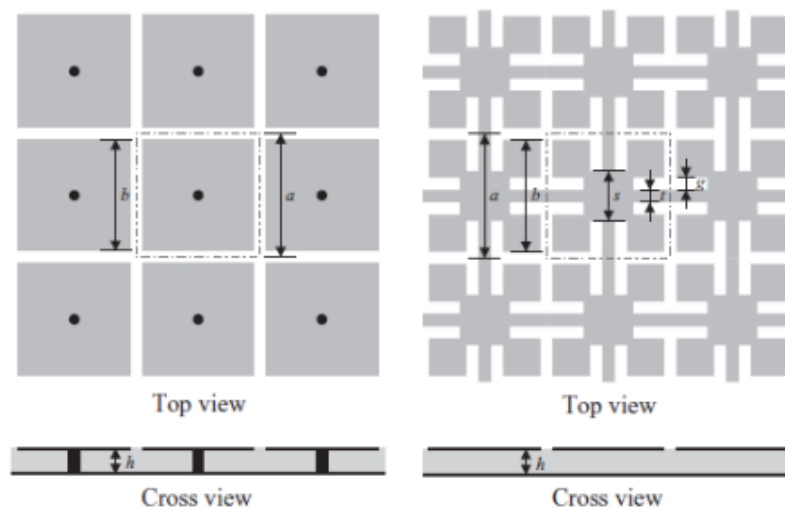


Figura 3.43 Diferencias entre una estructura EBG mushroom y planar [28].

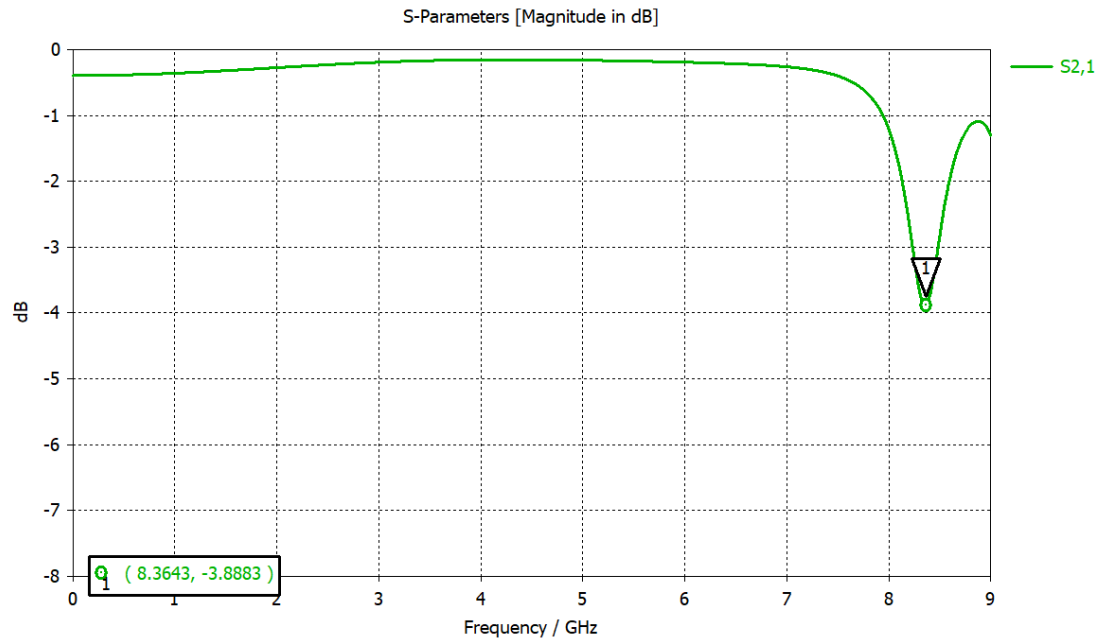


Figura 3.44. Parámetro S21 de la estructura EBG planar.

En la figura 3.44 se ve lo importante de la vía a la hora de conseguir una mejor profundidad del parámetro S21 o como con una misma celda de las mismas dimensiones que del tipo mushroom se consiguen frecuencias mayores. Por tanto si se quisiera conseguir la misma frecuencia que nuestro caso de estudio, debemos aumentar notoriamente el tamaño de la celda EBG. Además, si quisiéramos mejorar la profundidad necesitaríamos crear más celdas EBG separadas periódicamente para así mejorar esta característica, pero con el inconveniente de que el ancho de banda aumentará y nuestra celda ya no filtrará muy bien una determinada banda de frecuencias sino que aceptará un rango más amplio. Es por estas razones que se trabajará en un modelo final que permite eliminar varias bandas basado en la estructura de tipo mushroom.

3.3 ESTUDIO DE DISTINTAS FORMAS DE CELDAS EBG

3.3.1 Estructura EBG de 2 Celdas

Tomando como referencia las dimensiones de la celda EBG estudiada previamente, se crea otra a modo de espejo respecto a la línea de alimentación para comprobar que efectos o cambios son producidos.

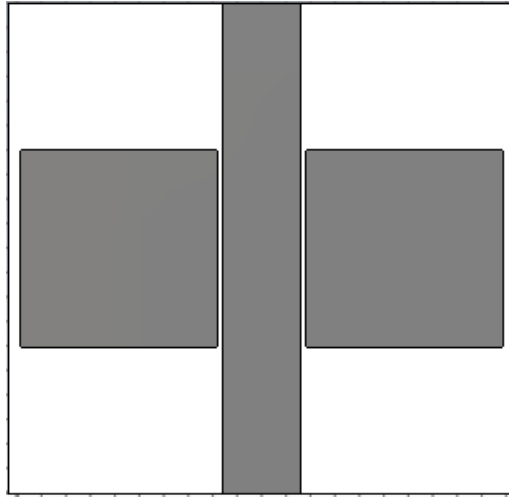


Figura 3.45. Modelo de estructura EBG compuesta por dos celdas de tipos mushroom.

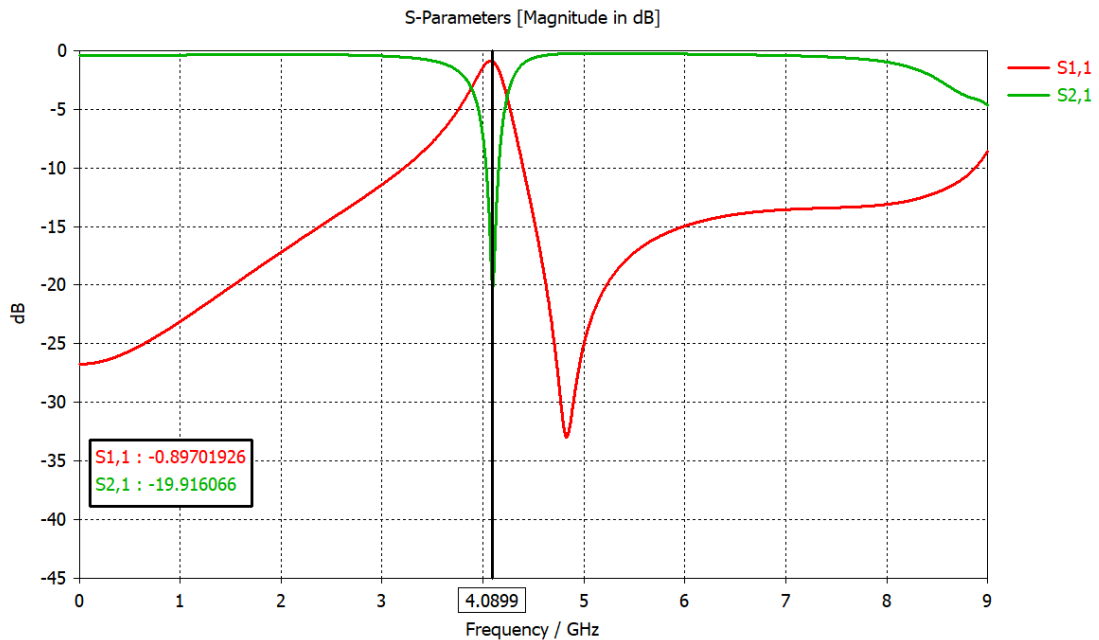


Figura 3.46. Parámetros S21 y S11 del modelo propuesto.

Se aprecia en la figura 3.46 que si queremos ampliar el ancho de banda medido a un cierto nivel de dB (-10 dB en nuestro caso) y mantener el valor de la frecuencia a rechazar, otra celda EBG simétrica es necesaria para ello. Concretamente si comparamos los 44 MHz de ancho de banda de la figura 3.21 con los 123 MHz conseguidos usando una celda imagen, vemos que el ancho de banda o rango de frecuencias a rechazar por nuestra estructura aumenta en un 79 MHz aproximadamente. Además podemos observar que la profundidad del parámetro S21 aumenta en 1 dB en este caso.

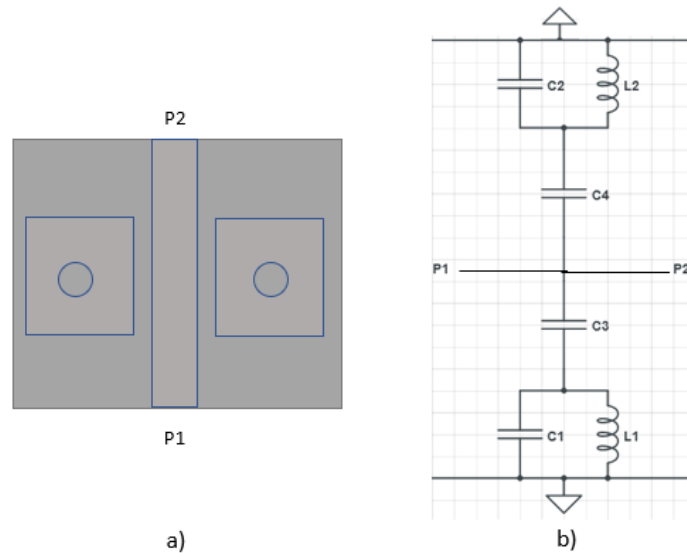


Figura 3.47. Vista superior del modelo propuesto (a) y circuito equivalente LC (b).

En la figura 3.47 se muestra en a) el modelo simulado indicando los puertos y en b) se muestra el circuito equivalente según el modelo de circuitos. En este caso cada celda EBG tiene una representación equivalente a la otra, es decir el circuito equivalente LC resuena a una misma frecuencia, es por esta razón que en la simulación esto nos proporciona una mayor profundidad y ancho de banda. C3 y C4 representan la separación entre la línea de alimentación y cada celda unitaria EBG.

Si hay dos celdas EBG continuas en el eje horizontal como en la figura 3.48, la segunda celda EBG no tiene contacto con la línea de transmisión, por lo que una capacidad entre la línea y esta celda no existiría. Lo que si existe es una capacidad debida al gap que hay entre ambas celdas EBG, esto se representa en la siguiente imagen:

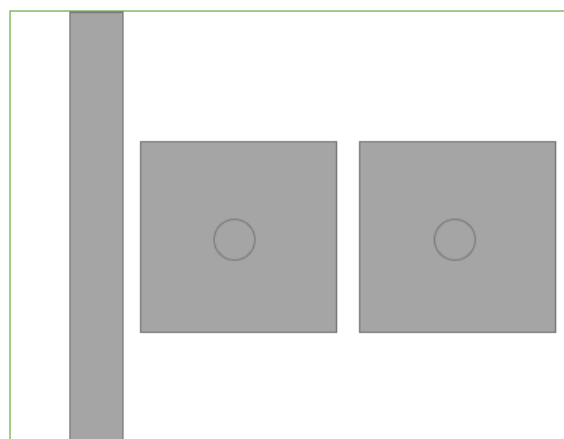


Figura 3.48 Modelo a simular con línea de alimentación en una esquina

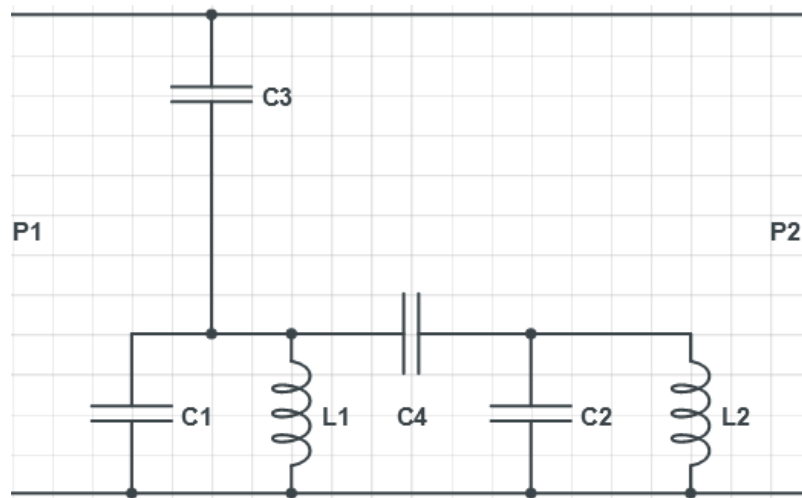


Figura 3.49 Circuito equivalente LC de la figura 3.50

La capacitancia que une estas dos celdas unitarias viene representada en la figura 3.49 por $C4$, esta depende expresamente de la distancia o gap entre ella. Es decir, si esta distancia aumenta bastante, la capacitancia se hace cero y esto equivale a un circuito abierto.

3.3.2 Estructura EBG de 4 Celdas

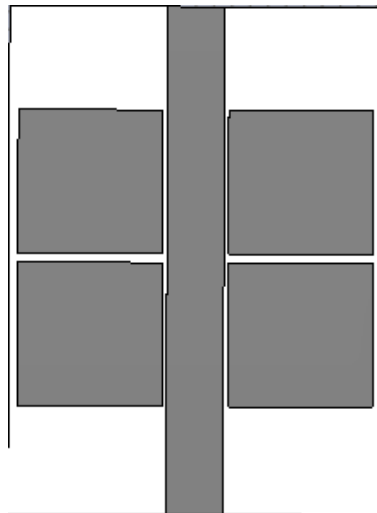


Figura 3.50. Modelo de estructura EBG compuesta por 4 celdas de tipo mushroom.

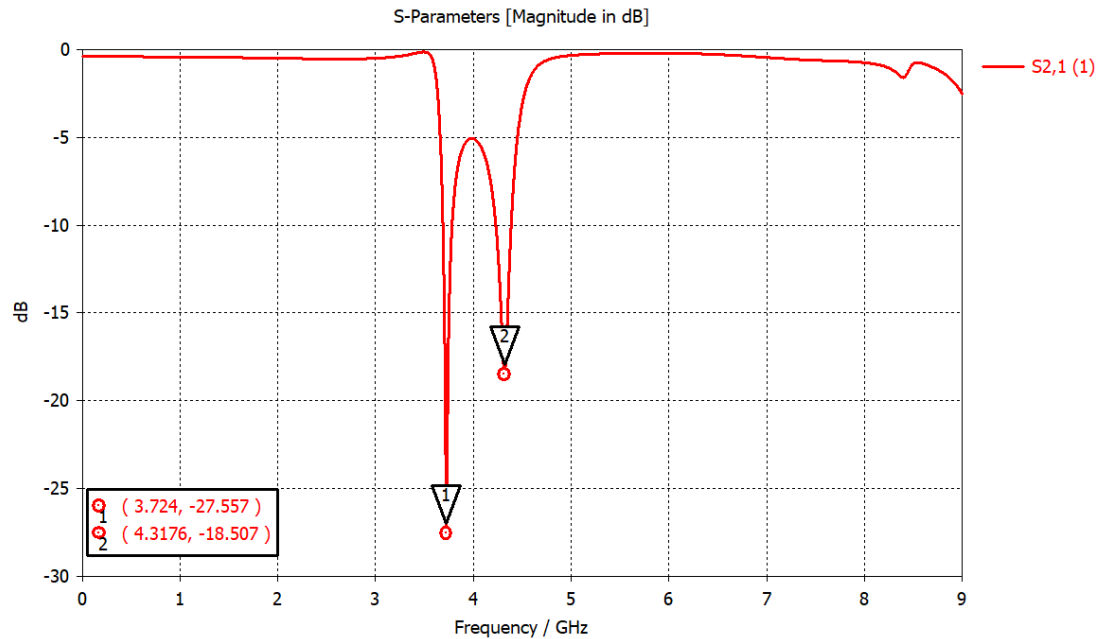


Figura 3.51. Parámetros S21 del modelo propuesto.

Como se aprecia en la figura 3.51 tenemos dos bandas de frecuencias EBG, la primera a 3.724 GHz y la segunda a 4.3176 GHz. Lo que se denomina como C3 en la figura 3.52 se refiere a la separación entre celdas unitarias EBG como se ha visto en el modelo anterior. A mayor separación, menor capacidad, luego la impedancia se hace infinita representando un circuito abierto. Cuando sucede esto las dos frecuencias de cada celda unitaria se solapan aumentando el ancho de banda y la profundidad o atenuación en las pérdidas de inserción.

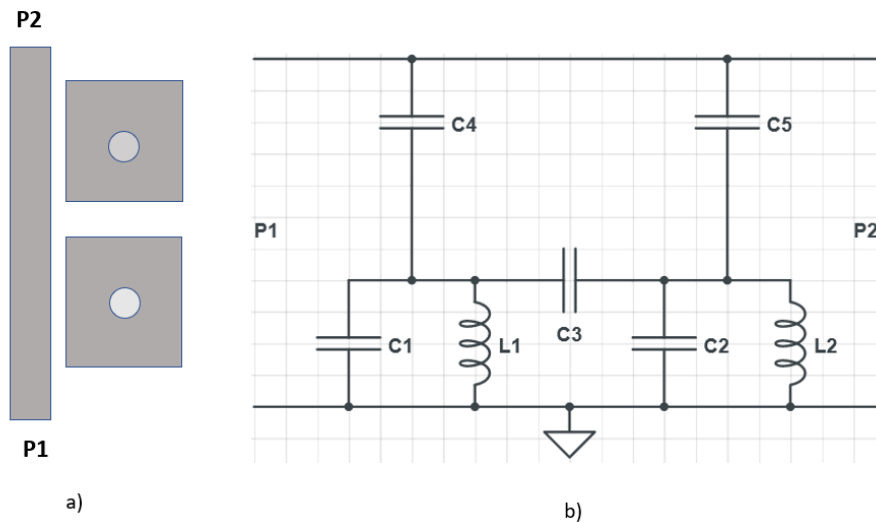


Figura 3.52. Vista superior del modelo propuesto (a) y circuito equivalente LC (b)

En la figura 3.52 se muestra una forma abreviada de simulación y modelo de circuitos, representado por solo 2 celdas por simplicidad. En la figura 3.53 se crea un parámetro que nos permita aumentar la separación vertical entre celdas para así ver el efecto que esto produce. A medida que la distancia aumenta, la capacidad tiende a cero, por lo que la impedancia tiende a infinito (circuito abierto). Cuando esto sucede si las celdas tienen

las mismas dimensiones sus respectivas frecuencias de resonancia se superponen aumentando así la atenuación y el ancho de banda del rango de frecuencias a eliminar.

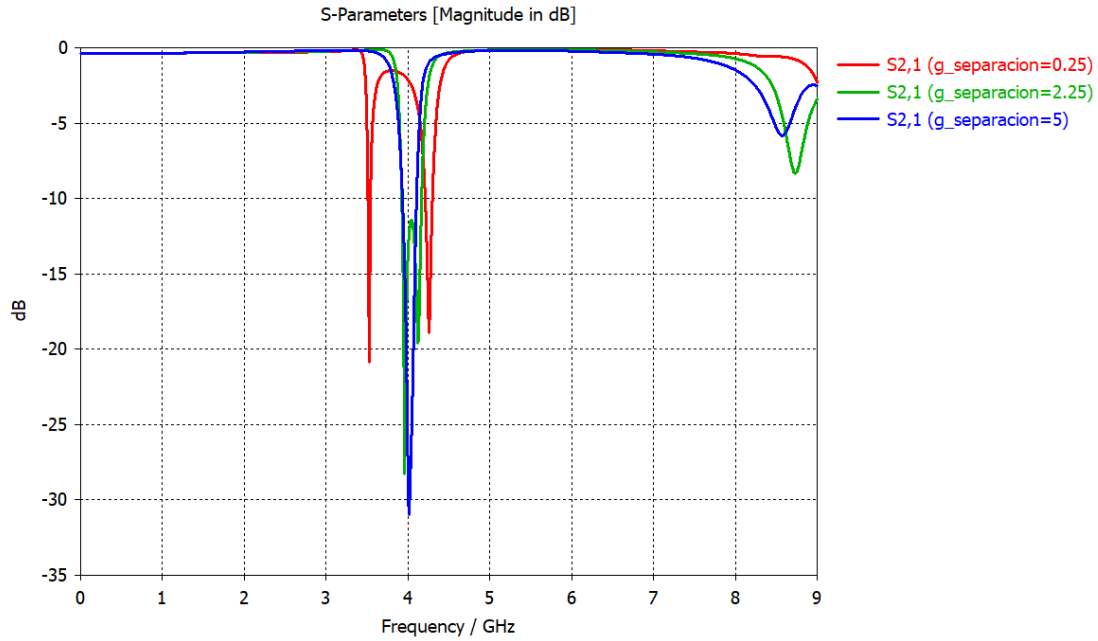


Figura 3.53.Efecto de variar el gap entre celdas en las pérdidas de inserción.

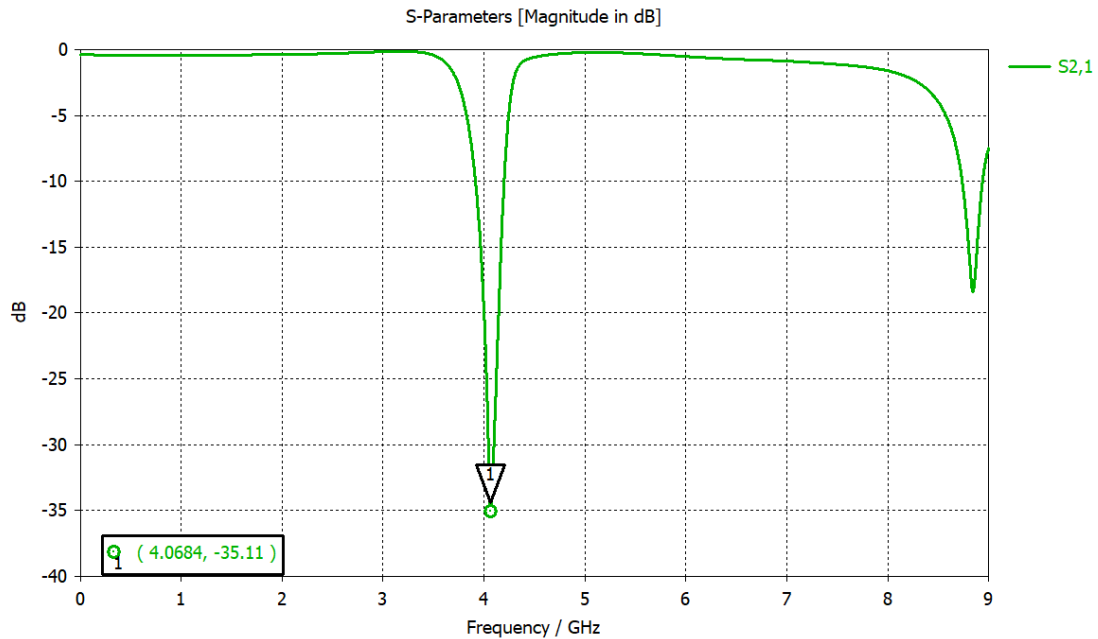


Figura 3.54.Parámetro S21 del modelo propuesto teniendo el gap un valor de 5mm.

En la figura 3.54 se observan las pérdidas de inserción de una estructura EBG de 4 celdas unitarias con una separación máxima (a partir de 5 mm se observa esta característica). Se tiene una frecuencia centrada a 4.06 GHz lo cual es muy parecida a la celda unitaria EBG de tipo hongo y un ancho de banda de unos 300MHz, lo cual son 256 MHz más de ancho de banda respecto a una sola celda formando una estructura EBG y 127 MHz más respecto

a una estructura EBG formada por 2 celdas. Sobre la profundidad, esta también mejora, concretamente ahora se tiene unos -34.959 dB.

Hasta ahora hemos visto el efecto de la resonancia, pero como se menciona en la teoría previa, a la estructura EBG se le conoce como una estructura periódica. La periodicidad en este caso depende de las dimensiones de la celda unitaria, osea la capacitancia generada por esta más la capacitancia extra generada por la separación entre celdas unitarias. Esto se refleja en la figura 3.55. Para ello se ha creado una variable que nos permita variar el tamaño de la celda EBG superior y ver así sus efectos.

Como se aprecia a medida que las dimensiones aumentan, las frecuencias sufren un desplazamiento hacia frecuencias menores y a la vez, a causa de esto se ve como a frecuencias altas aparece una banda que se va acercando poco a poco a nuestras bandas de estudio.

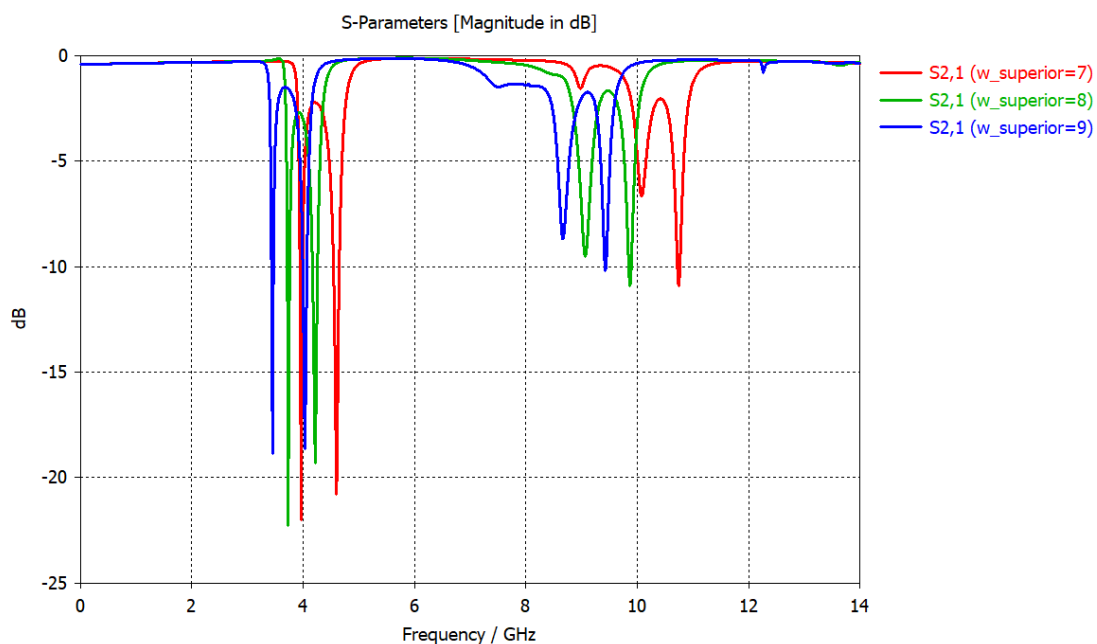


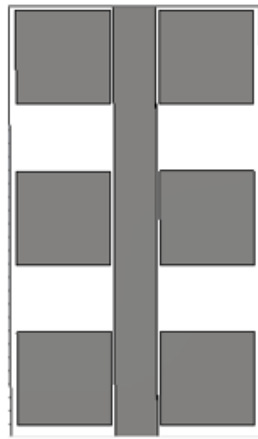
Figura 3.55. Parámetro S21 aumentando las dimensiones de las celdas unitarias.

3.3.3 Estructura EBG de 6 Celdas

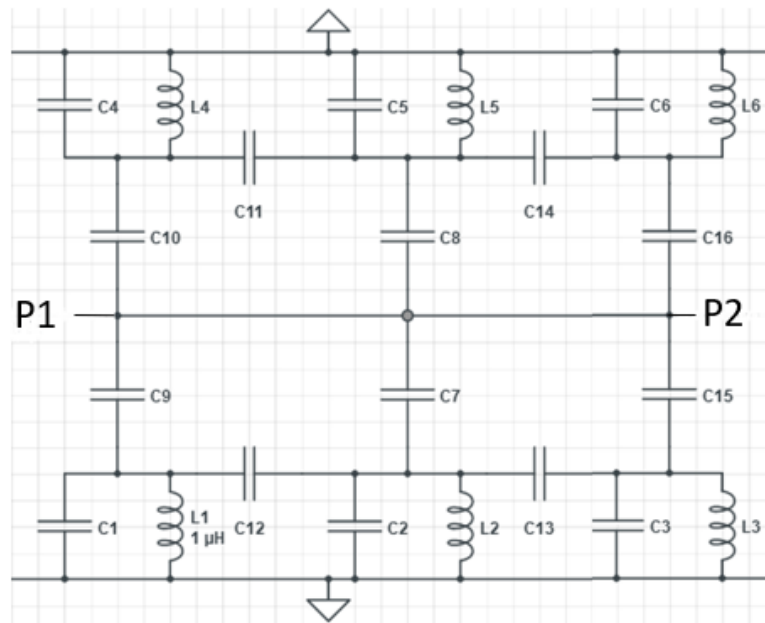
En la figura 3.56a se ha probado con 2 celdas más para confirmar estos efectos, convirtiendo así la estructura EBG en una de 6 celdas. En esta grafica se ha simulado el modelo con una separación entre celdas unitarias de 5 mm para apreciar como la frecuencia asociada a cada celda unitaria se junta en una aumentando así la profundidad y el ancho de banda de rechazo. El modelo equivalente LC se muestra en la figura 3.56b, en este caso en concreto se ha dibujado unos tanques LC teniendo en cuenta la línea de alimentación, esta se encontraría entre las capacidades intermedias dentro del mallado.

Sin retocar ningún parámetro relacionado a las dimensiones de las celdas unitarias, los resultados que devuelve esta estructura en la figura 3.57 son una frecuencia central a 4.5 GHz, lo cual esta unos 400 MHz por encima de la frecuencia de la figura 3.21 (una celda

EBG tipo hongo) y se puede igualar a 4 GHz reduciendo 0.5 mm cada celda unitaria. En lo que respecta al ancho de banda medido a -10 dB, este tiene un valor de 450 MHz, es decir, unos 406 MHz más de banda de frecuencias que filtrar que una sola celda de tipo hongo y 150 MHz más respecto a la estructura EBG de 4 celdas. En lo que respecta a la profundidad esta tiene un valor de -49.5 dB lo cual es un valor de atenuación bastante alto.



a)



b)

Figura 3.56. Modelo de estructura EBG compuesta por 6 celdas de tipo mushroom (a), modelo equivalente del circuito (b).

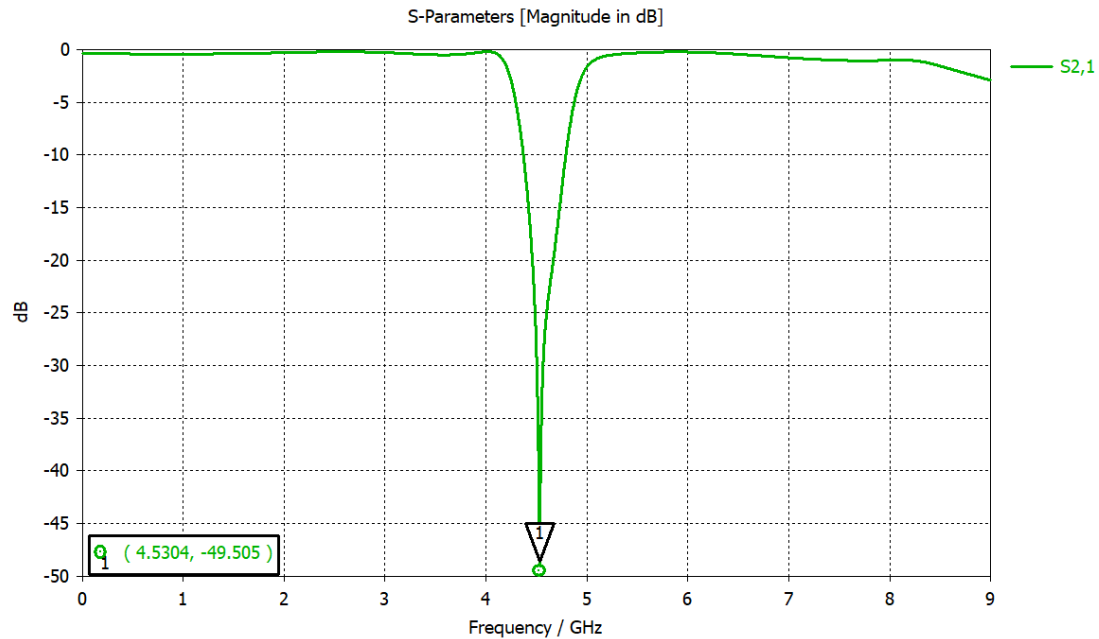


Figura 3.57. Parámetro S21 del modelo de 6 celdas.

3.3.4 Estructura EBG con forma de cruz

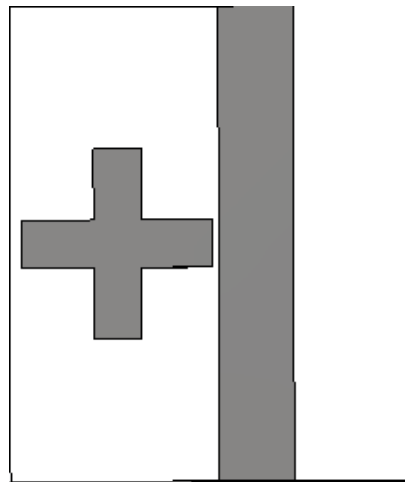


Figura 3.58. Modelo de estructura EBG con forma de cruz.

Se ha simulado una sola celda unitaria EBG con forma de cruz para ver que efecto tiene sobre la frecuencia, como se aprecia en la figura 3.60 que muestra el parámetro S21, la frecuencia se ha desplazada hacia valores mayores, esto es debido a que hemos disminuido la capacidad asociada a la celda unitaria, por tanto esto hace que el valor LC tanque de la ecuación 4 disminuya haciendo que la frecuencia sea mayor.

Este efecto se comprueba en la figura 3.61 donde se ha creado una variable para variar el ancho de cada brazo de la cruz, por tanto, si esta variable toma valores mayores, la frecuencia central se acerca a los valores de frecuencia de una celda unitaria de forma cuadrada. De hecho, el modelo de circuitos de esta celda unitaria es igual al de una celda

cuadrada como se aprecia en la figura 3.59, donde la única diferencia es que C1 tiene un valor menor de capacitancia.

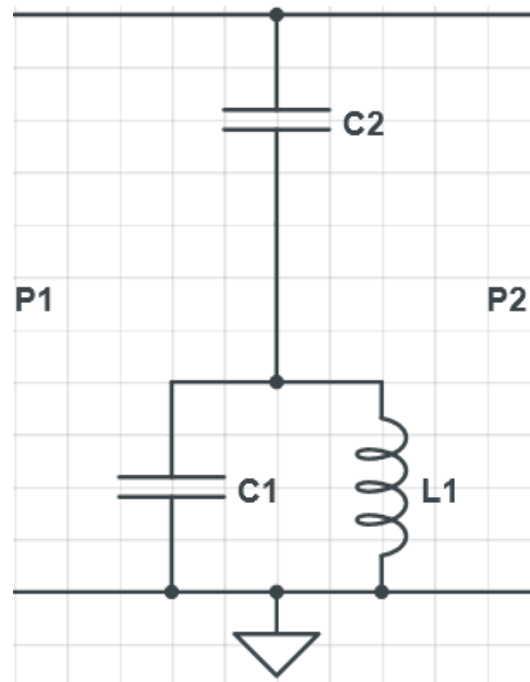


Figura 3.59 Modelo equivalente LC de una celda EBG con forma de cruz

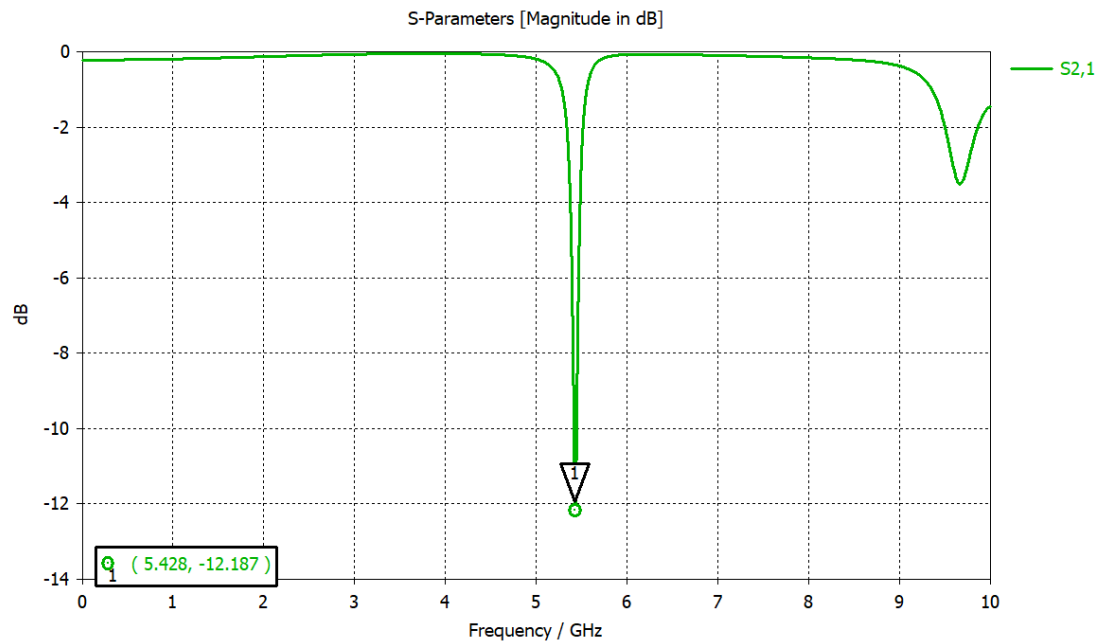


Figura 3.60. Parámetro S21 del modelo EBG con forma de cruz.

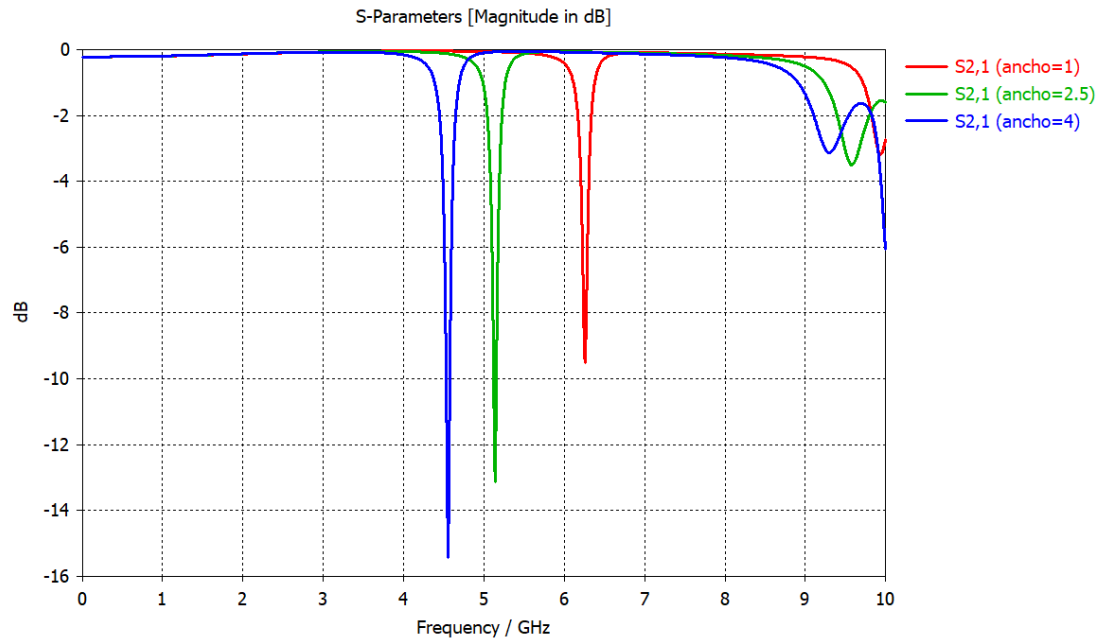


Figura 3.61. Parámetro S21 variando el ancho de la estructura.

3.3.5 Estructura EBG de Espiral

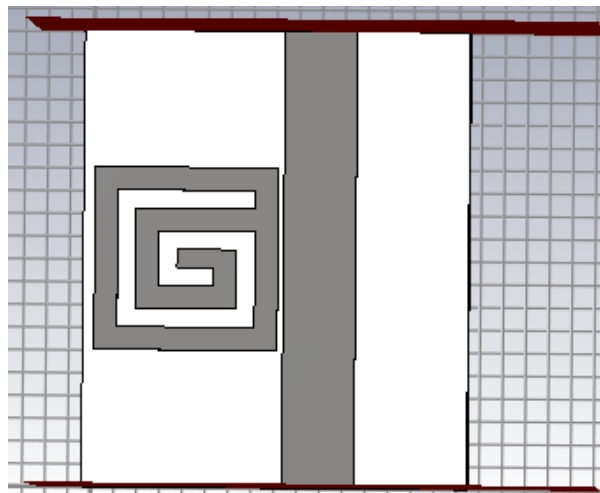


Figura 3.62 Parámetro S21 del modelo EBG con forma de espiral.

Para realizar esta forma se ha tenido en cuenta las mismas dimensiones que la estructura de tipo hongo como en los casos anteriores y se han realizado aberturas o ranuras dentro de la celda, las cuales generan una inductancia extra y por tanto la frecuencia centra sufre un desplazamiento hacia valores más bajos de frecuencia.

Otro efecto de realizar aberturas es que el ancho de banda de la estructura se reduce a 10 MHz, unos 34 MHz menos que la estructura básica de tipo hongo, dándonos más precisión a la hora de descartar una banda de frecuencia. La respuesta de ese modelo se ve en la figura 3.63.

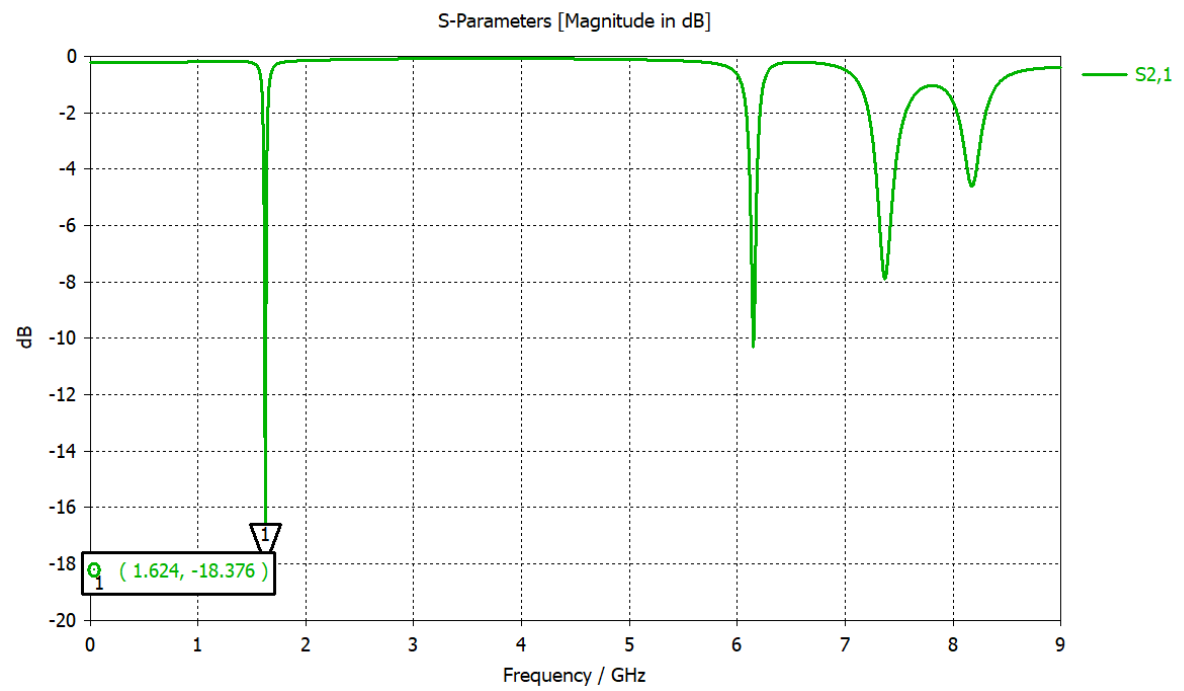


Figura 3.63 Parámetro S₂₁ del modelo EBG con forma de espiral.

4 INTEGRACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

Después del estudio y las pruebas hechas en el capítulo 3 de este trabajo, se mostrarán los modelos que se han elegido para conseguir una, dos y tres bandas eliminadas. Sobre cada una se hará un breve estudio y se mostrará con que parámetros puedes controlar cada una de las bandas medidas a un mínimo de -10 dB de atenuación que es el objetivo de este trabajo.

4.1 FILTRO DE FRECUENCIAS A 3.5 GHz y 5.5 GHz

Para este primer caso se ha usado una celda unitaria cuadrada a la cual se le ha hecho una apertura como se muestra en la figura 4.1. En esta figura se muestran cada uno de los parámetros a estudiar. Con esta apertura lo que se consigue es conseguir una segunda banda de frecuencia sin retocar las dimensiones de la celda unitaria. El crear aberturas o ranuras hace que aparezca una cantidad extra de inductancia, esta viene determinada por la siguiente ecuación según [23]:

$$L_{extra}=0.2 W_e \left(\ln\left(\frac{2 W_e}{L_e}\right) + \frac{0.22 L_e}{W_e}+0.5 \right) \quad (10)$$

Para la línea de transmisión se han usado las mismas dimensiones de anchura y altura usadas hasta el momento para obtener una impedancia de entrada a 50 ohmios. La celda EBG mide 8 mm por cada lado, en la figura 4.1 esta dimensión esta denotada por la variable W, la altura de la abertura tiene unos 0.95 mm, la profundidad de la abertura es de unos 7.7 mm y se ha usado como sustrato un Taconic RF-35 con pérdidas (0.0025 de constante). En lo que respecta a la posición de la vía, esta no está centrada respecto a las dimensiones de la celda EBG, lo está en lo que respecta a anchura, es decir está centrada, pero no en altura, está a 5.5 mm (respecto de los 4 mm que es el centro).

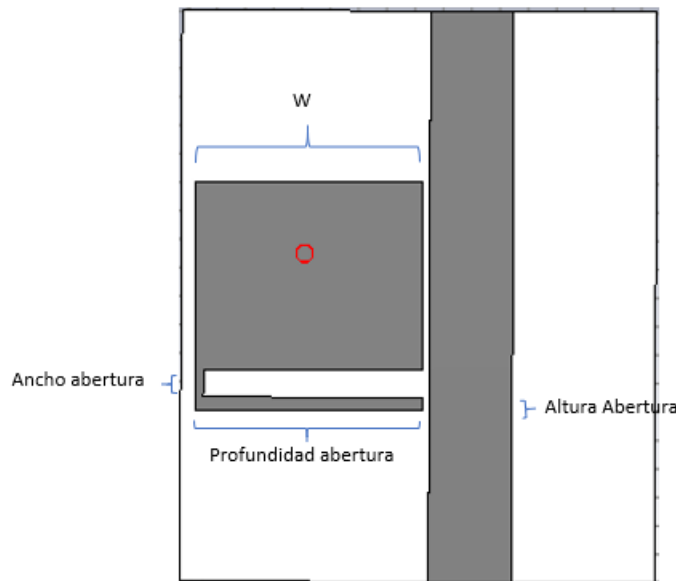


Figura 4.1. Modelo EBG para obtener un filtro cercano a los 3.5 GHz y 5.5 GHz.

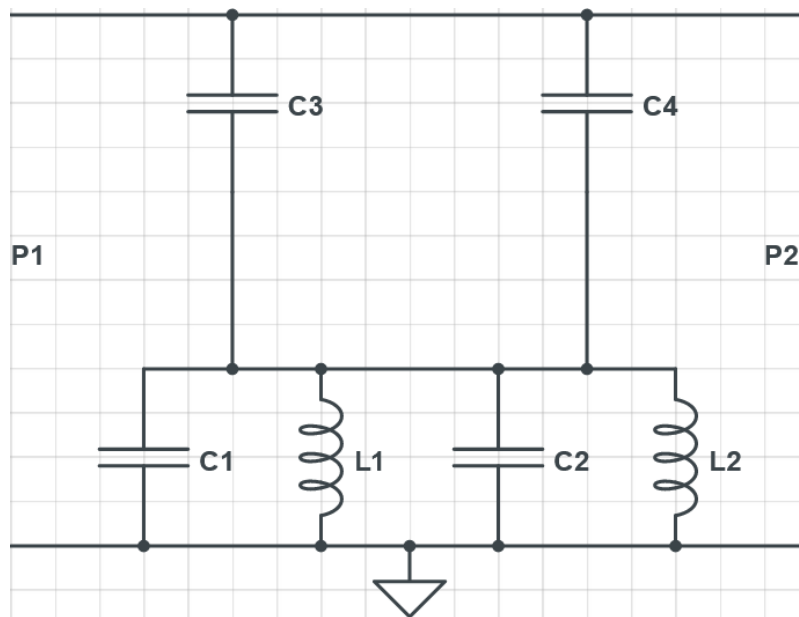


Figura 4.2. Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión

En la figura 4.2 se muestra el circuito equivalente de la estructura EBG a simular. Los componentes con la etiqueta numero 1 indican la celda unitaria EBG cuadrada y lo que tiene la etiqueta 2 se refiere al brazo de línea metálica debajo con forma de L. La capacitancia C3 se refiere al gap entre a línea de transmisión y la celda EBG cuadrada, la capacitancia C4 se refiere al gap entre la línea y el brazo metálico o celda EBG con forma de L.

El primer parámetro por variar para ver sus efectos es W (tamaño de la celda cuadrada EBG). Como se esperaba, al aumentar este crea un desplazamiento en frecuencia de las dos bandas hacia frecuencias inferiores, en la figura 4.3 se ven las pruebas realizadas para valores de W=6 mm, 7 mm, 8 mm. Este parámetro afecta por igual a las dos bandas.

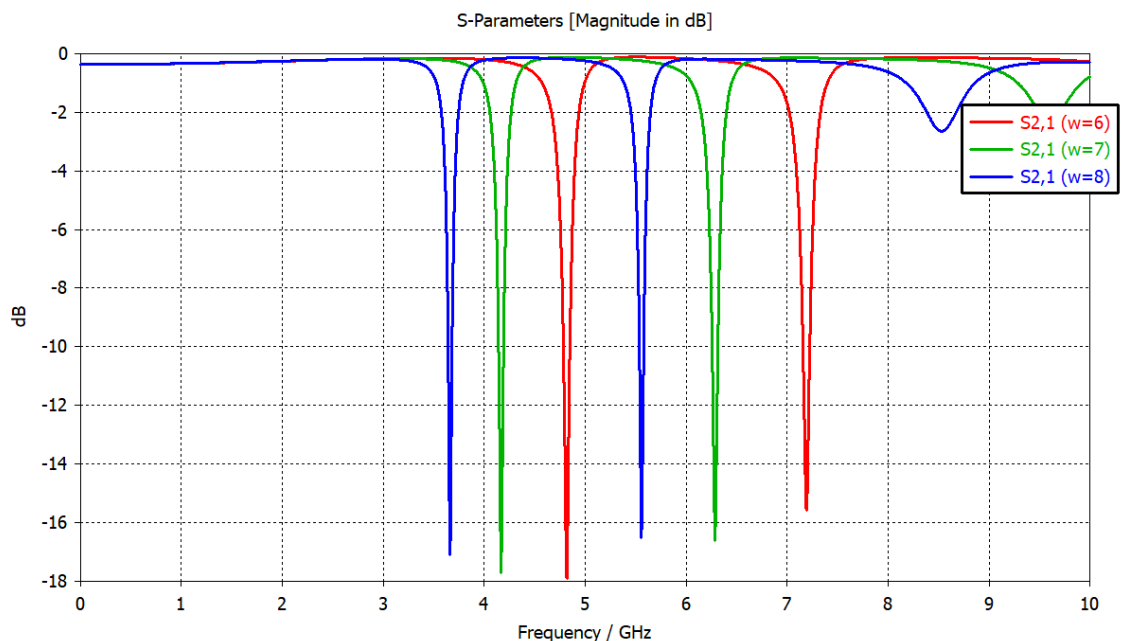


Figura 4.3. Efecto de variar las dimensiones de la estructura EBG en general.

El segundo parámetro por variar es el radio (o indirectamente el diámetro de la vía). Como se aprecia en la figura 4.4, se han hecho pruebas para valores de 0.2 mm, 0.5mm, 0.8mm, 1mm y a medida que este aumenta tiene un efecto bastante más notorio en la segunda banda. Como se apreció en simulaciones anteriores, aumentar el radio produce una inductancia menor, por tanto a mayor valor, menor valor de inductancia y por ende, desplazamiento de frecuencia hacia frecuencias superiores.

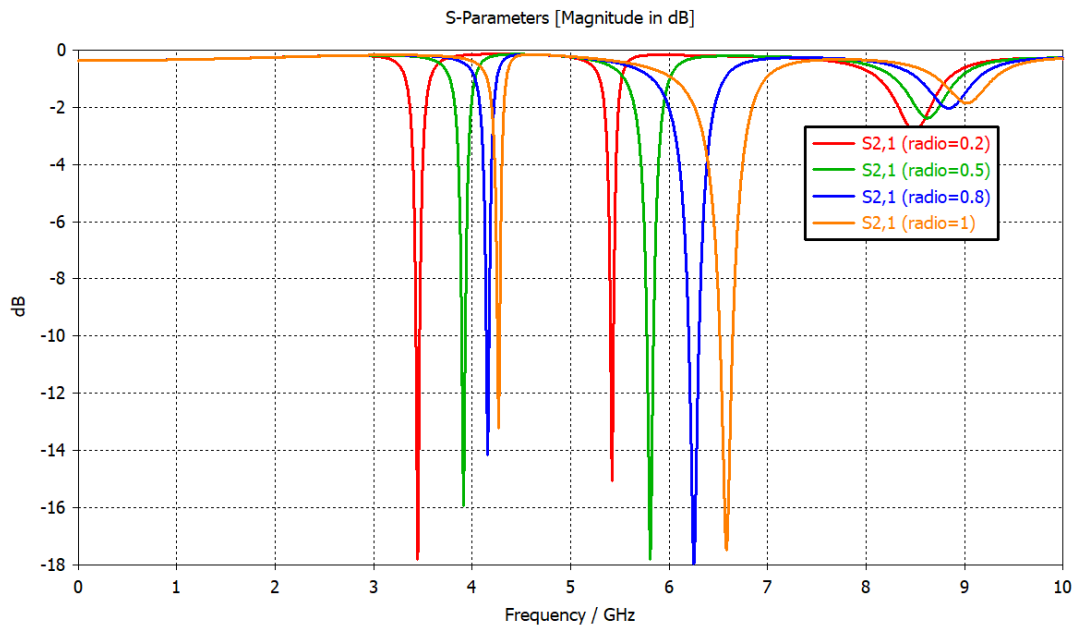


Figura 4.4.Efecto de variar el radio.

El tercer parámetro por variar es la profundidad de la abertura, como se aprecia en la figura 4.5 se han realizado pruebas con valores de 6.2 mm, 6.7 mm, 7.2 mm, 7.7 mm y este afecta solo a la segunda banda. En la figura se aprecia que aumentar este valor tiene un efecto más notable en la segunda banda, lo cual nos permite controlar y adaptar mejor está a las necesidades de diseño.

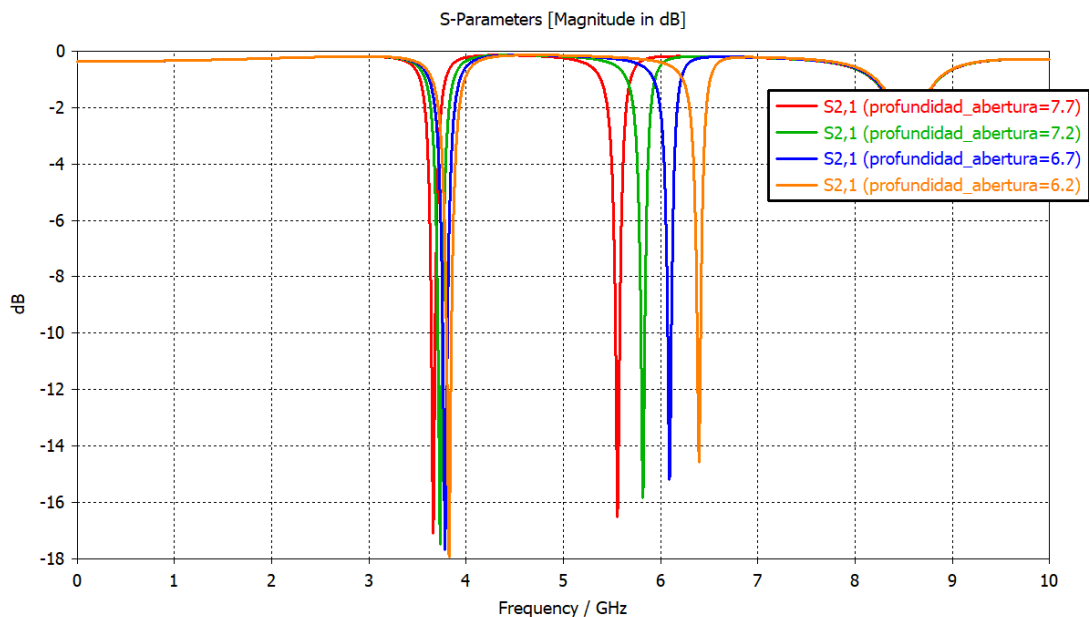


Figura 4.5 Efecto de variar la profundidad de la abertura.

El cuarto parámetro por variar es la altura de la abertura, concretamente se han medido los valores de 0.3 mm, 0.8mm y 1.3 mm como se aprecia en la figura 4.6.

Se aprecia que al aumentar la altura, la primera banda de frecuencia se desplaza hacia frecuencias inferiores, manteniéndose la segunda banda intacta en frecuencia, por lo que este parámetro puede resultar útil para ajustar solo la primera banda.

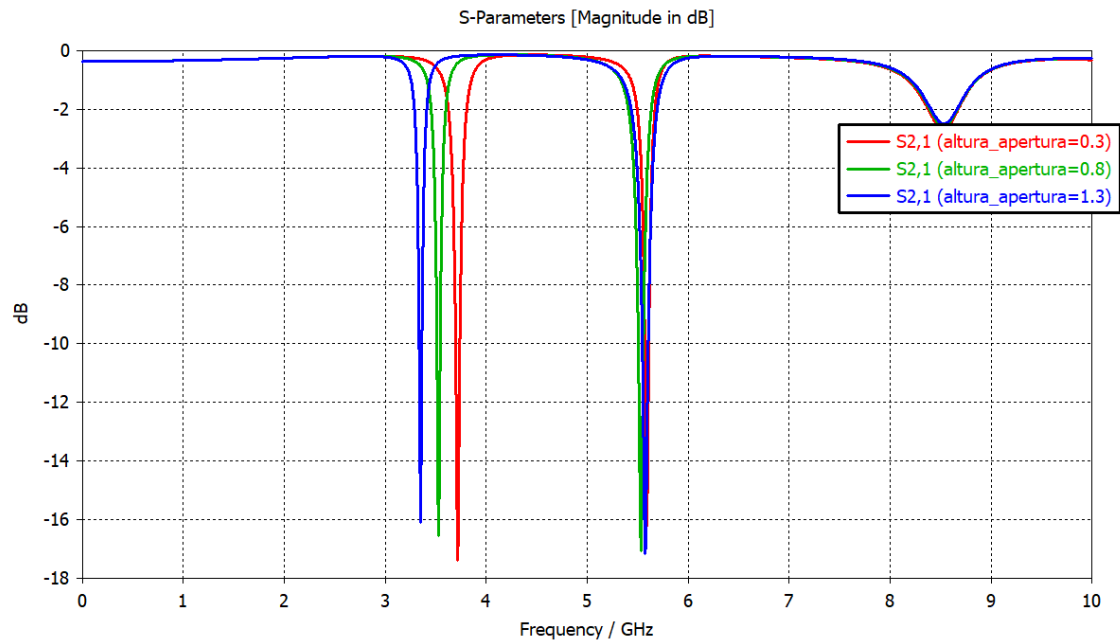


Figura 4.6 Efecto de variar la altura de la abertura.

Otro parámetro sobre el cual se realizan pruebas es la altura de la vía, es decir, su posición en el eje vertical (figura 4.7). El aumentar el valor de la vía tiene dos efectos distintos en las bandas de frecuencia, en la primera hace que su valor disminuya mientras que en la segunda hace que el valor aumente, por tanto, a mayor valor la separación entre bandas también lo es.

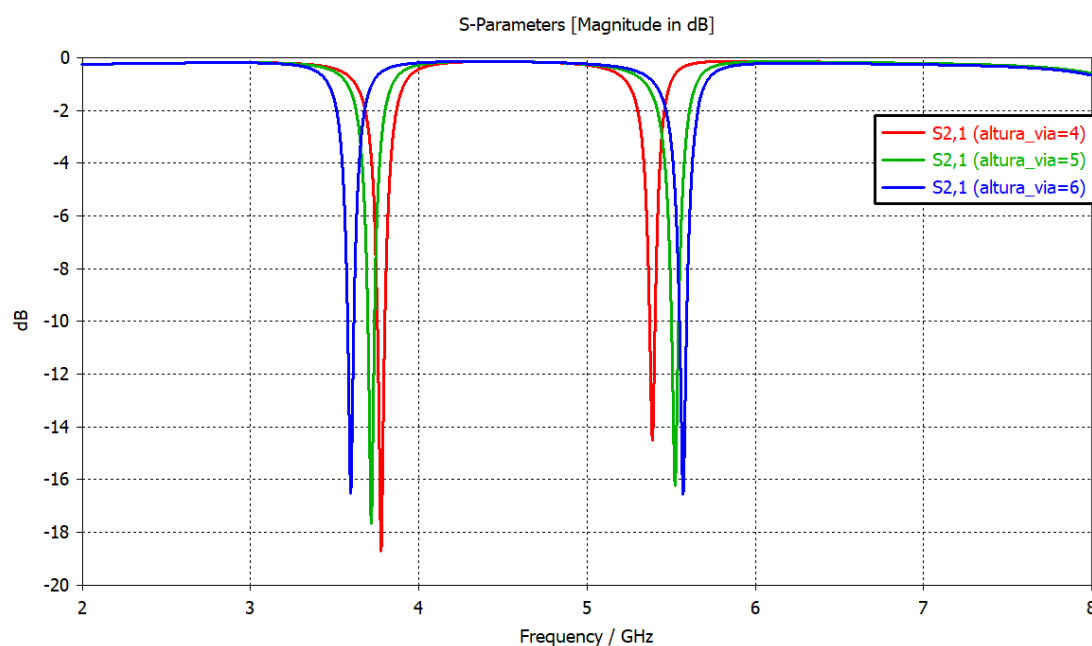


Figura 4.7.Efecto de variar la altura de la vía (eje Y).

Por último nos queda probar el variar el ancho de la abertura. Los efectos que tiene este parámetro sobre la primera y la segunda banda son similares como se aprecia en la figura 4.8.

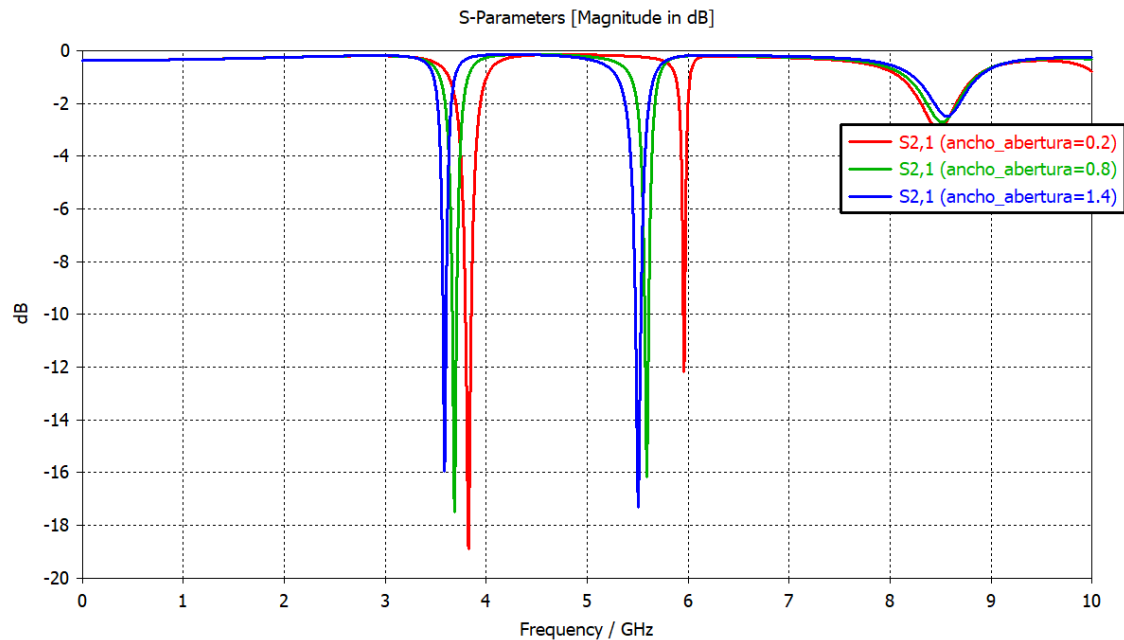


Figura 4.8.Efecto de variar el ancho de la abertura.

Realizada todas las pruebas y simulaciones, se procede a escoger los parámetros adecuados que nos des unas bandas de frecuencias cercanas a las que buscamos teniendo en cuenta el factor de -10 dB en las pérdidas de inserción, los valores son los mencionados al inicio de este apartado. Así, en la figura 4.9 se observa que los valores finales son una primera banda a 3.6 GHz con una profundidad de -17 dB y una segunda banda de 5.5 GHz con una profundidad de -16.5 dB. Tienen un ancho de banda de 40 MHz en la primera banda y 50 MHz en la segunda banda.

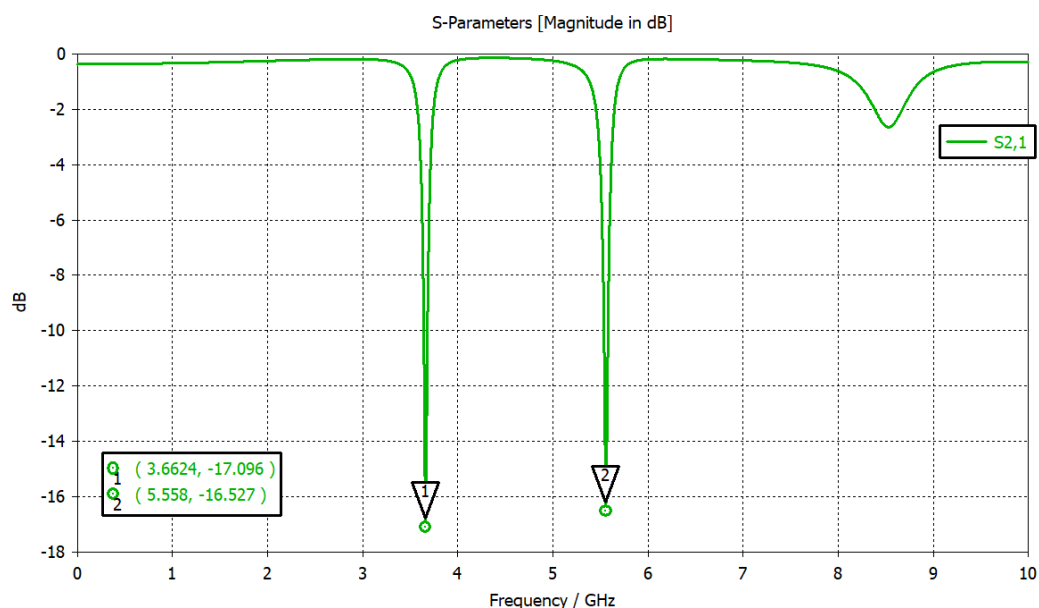


Figura 4.9.Perdidas de inserción con las dos bandas de frecuencia propuestas.

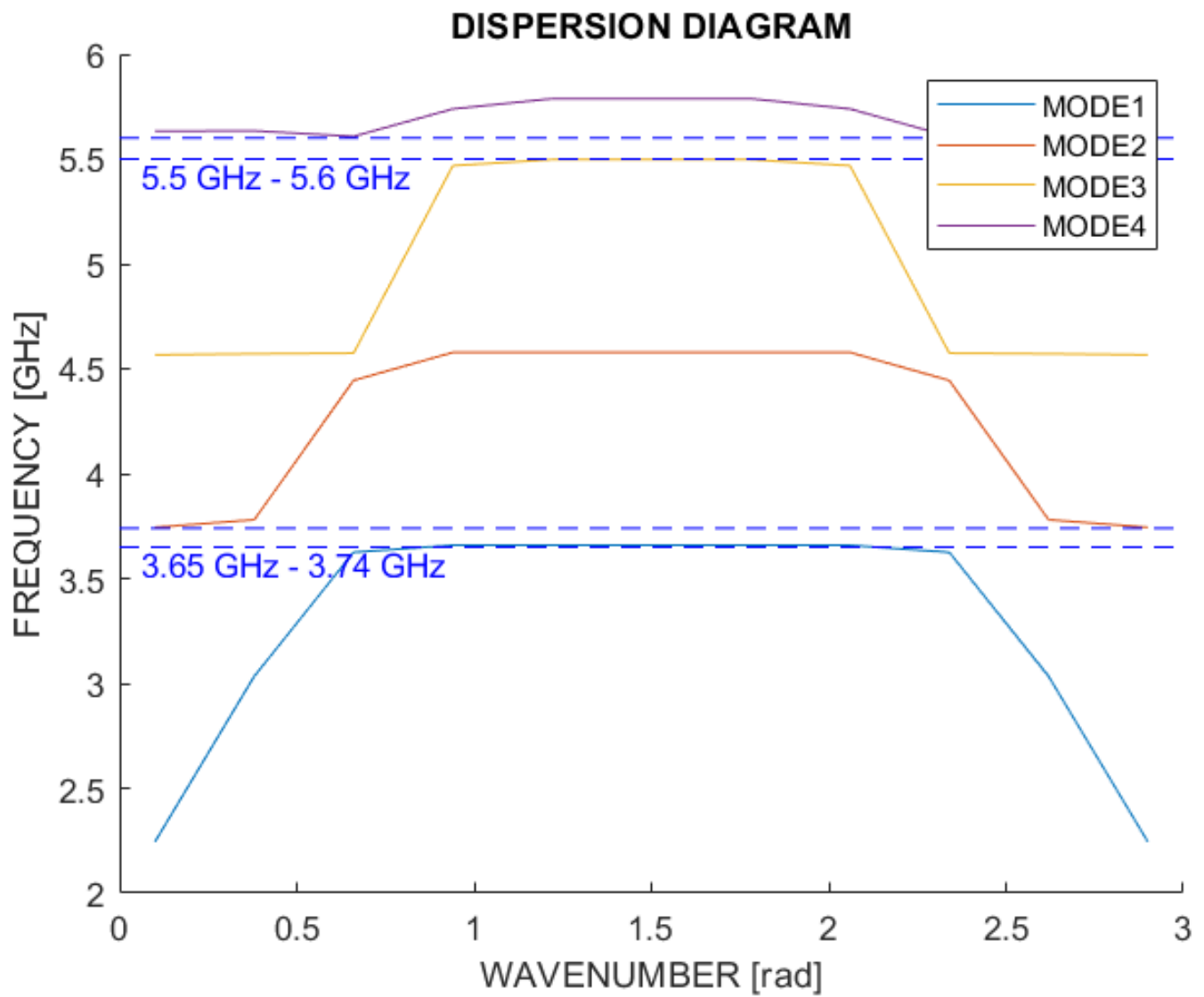


Figura 4.10. Diagrama de dispersión del filtro propuesto.

En la figura 4.10 se observa el diagrama de dispersión para una celda simulada como la de la figura 4.1.

4.2 FILTRO DE FRECUENCIAS A 5.5 GHz y 7.5 GHz

Este modelo mantiene en cierta manera la forma de la estructura EBG del filtro anterior con la única salvedad de que ya no se tiene una celda cuadrada, sino rectangular. En la figura 4.11 se indican los parámetros a tener en cuenta en este nuevo modelo, el parámetro “anchura EBG” tiene un valor de 4.5 mm, el parámetro “altura EBG” tiene 6.75 mm, el parámetro “Ancho abertura 1” tiene 0.5 mm, el parámetro “Ancho abertura 2” tiene 0.5 mm y la profundidad de la abertura que tiene dos valores distintos, la que esta abajo tiene 4 mm y la otra tiene un valor de 4.3 mm. El sustrato usado es RF-35, con un espesor de 1.524 mm.

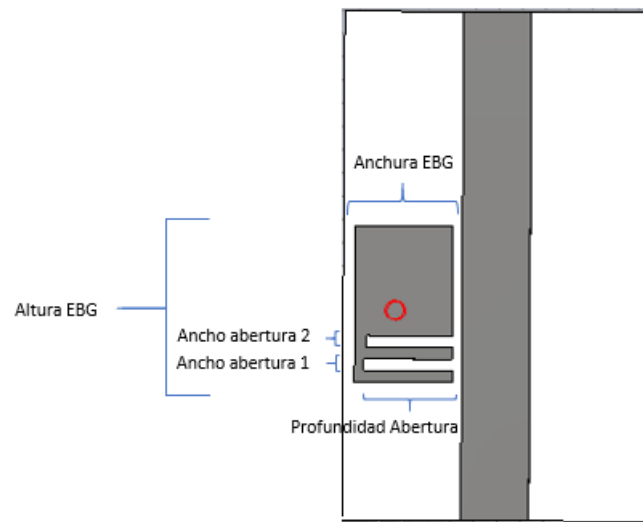


Figura 4.11. Modelo EBG para obtener un filtro en bandas 5.5 GHz y 7.5 GHz.

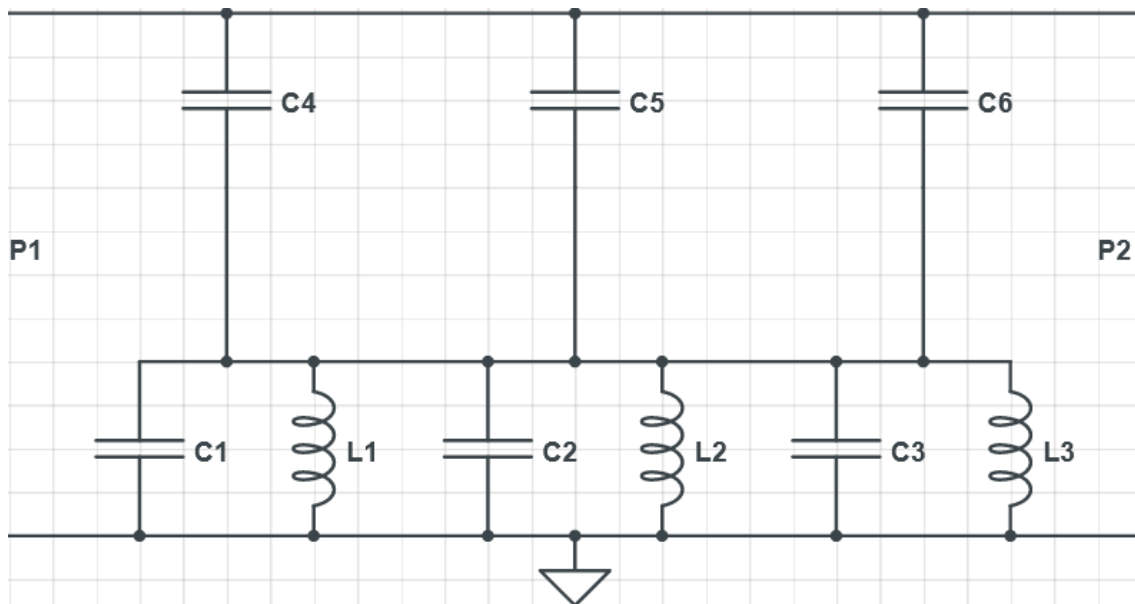


Figura 4.12. Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión.

La figura 4.12 nos muestra el modelo equivalente circuital de la estructura EBG. Como en el primer filtro, L1 y C1 son definidos a causa del parche con forma rectangular o cuadrada superior. L2, C2, C3 y L3 se refieren a los brazos con forma de L debajo de la celda rectangular y C4, C5, C6 se refieren al respectivo gap entre estos brazos y la línea de alimentación.

Se hacen varias simulaciones variando cada parámetro para ver el efecto que tiene cada uno en las frecuencias o en una frecuencia determinada. En la figura 4.13 se muestra las pérdidas de inserción o S21 variando el parámetro “altura EBG” con unos valores de 3.8 mm, 5.3 mm y 6.8 mm.

Aumentar el valor de este parámetro afecta notoriamente a la segunda banda, por lo cual es un factor para tener en cuenta si lo que se quiere es ajustar esta banda solamente, aunque afecte un poco a la primera.

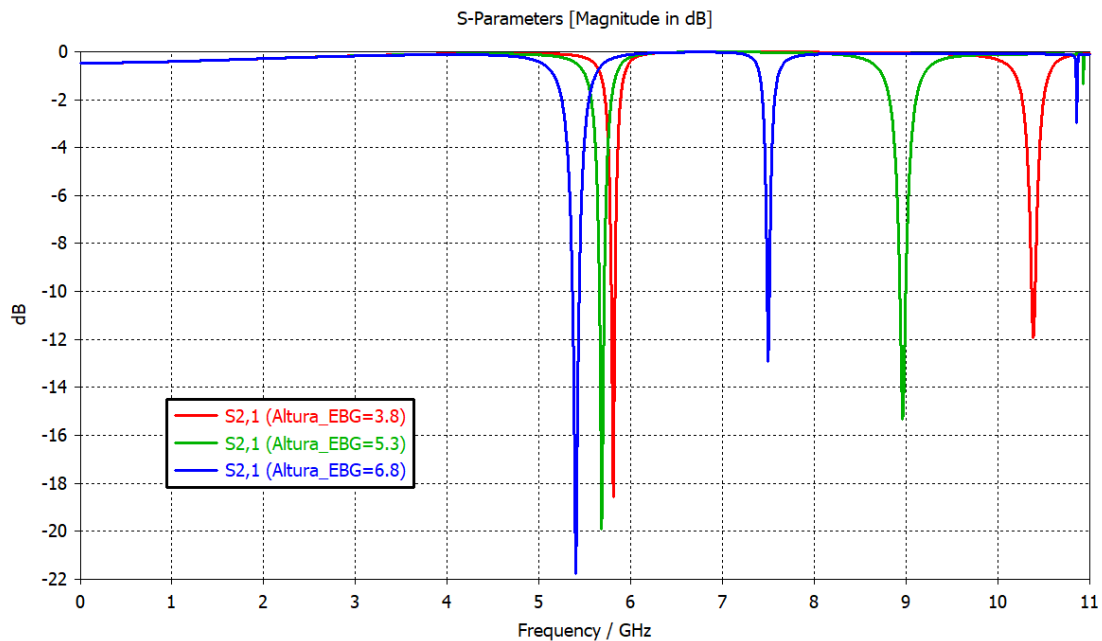


Figura 4.13.Efecto de variar la altura de la celda EBG.

El segundo parámetro sobre el que se realizan pruebas es “anchura EBG”. Los valores elegidos para las pruebas han sido 4 mm, 4.8 mm y 5.6 mm como se aprecia en la figura 4.14. Este parámetro nos permite controlar la primera banda de frecuencias, aumentando su valor se consigue desplazar la primera banda hacia frecuencias inferiores y disminuyéndolo conseguimos desplazarlo hacia frecuencias superiores. En la segunda banda el efecto que tiene, aunque muy poco, es distinto. Es decir, si aumentamos el valor de este parámetro, en vez de obtener un desplazamiento hacia frecuencias inferiores, se desplaza ligeramente hacia frecuencias mayores.

La profundidad de las pérdidas de inserción tiene un efecto distinto al visto con la frecuencia, es decir, para la primera banda, si se aumenta el valor del parámetro “anchura EBG”, la profundidad a nivel de dB aumenta, lo cual no es bueno ya que para un valor grande de este parámetro, la primera banda puede llegar a no tomarse en cuenta, es decir,

sobrepase el valor mínimo de -10 dB establecidos en este trabajo. En la segunda banda, a medida que este parámetro aumenta, la atenuación disminuye.

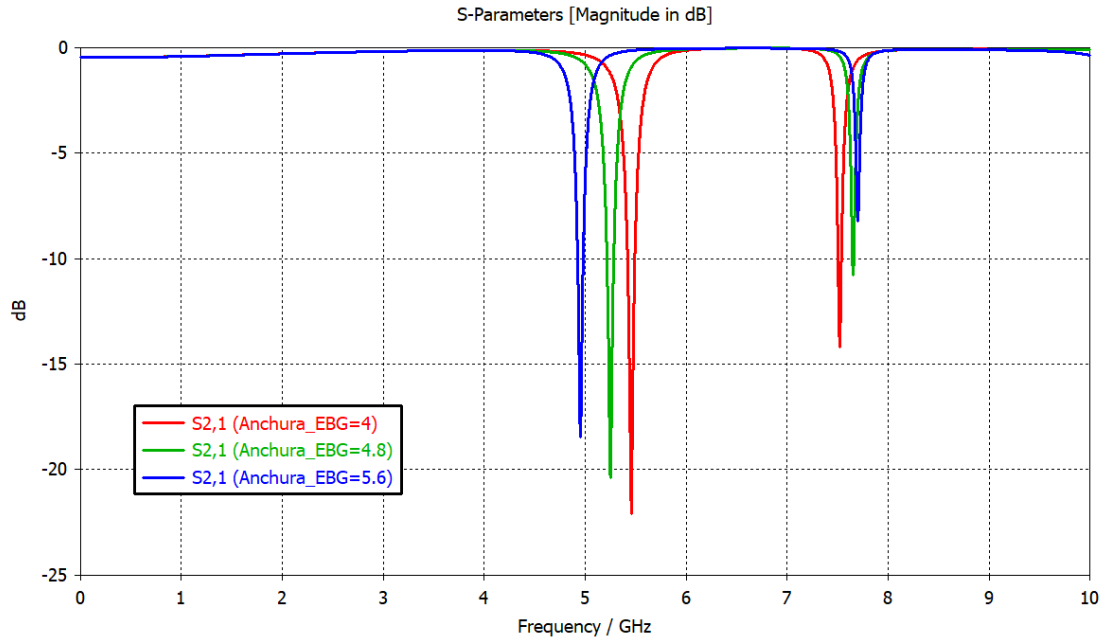


Figura 4.14.Efecto de variar la anchura de la celda EBG.

El tercer y cuarto parámetro por variar son los anchos de las aberturas como se aprecia en las figuras 4.15 y 4.16, en la figura 4.15 se han tenido en cuenta unos valores de 0.2 mm, 0.4 mm, 06 mm y en la figura 4.16 se han tenido en cuenta los valores de 0.2 mm, 0.5 mm y 0.8mm. Como se aprecia en ambas figuras el efecto parece ser un poco distinto, aunque en las dos se desplaza la frecuencia hacia valores inferiores, solo que en la figura 4.16 esto se aprecia con más facilidad respecto a la figura 4.15.

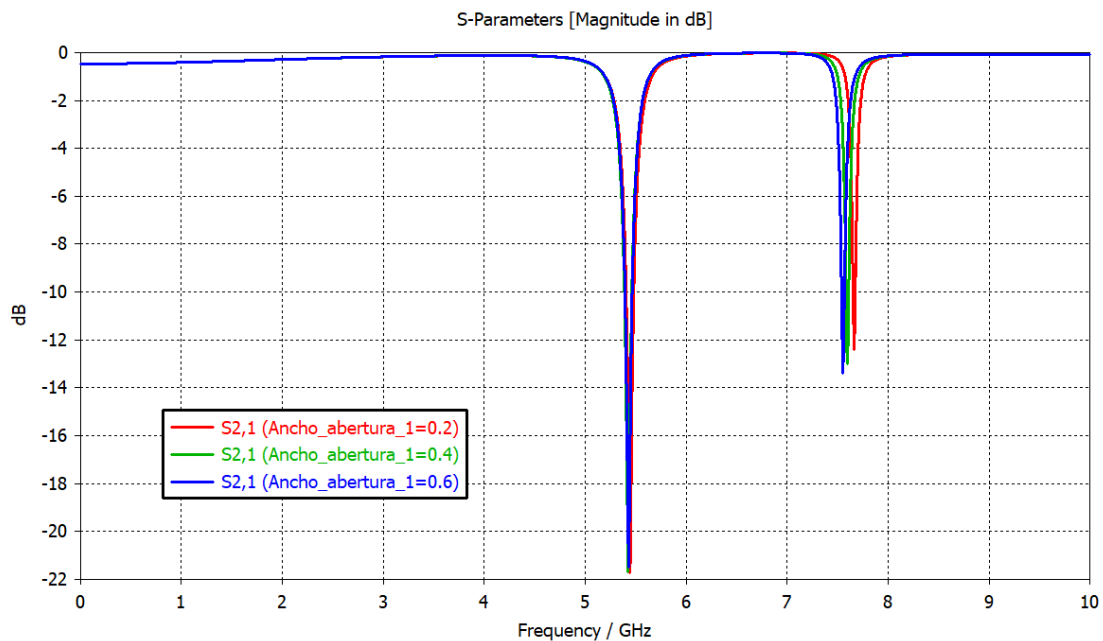


Figura 4.15.Efecto de variar el ancho de la primera abertura.

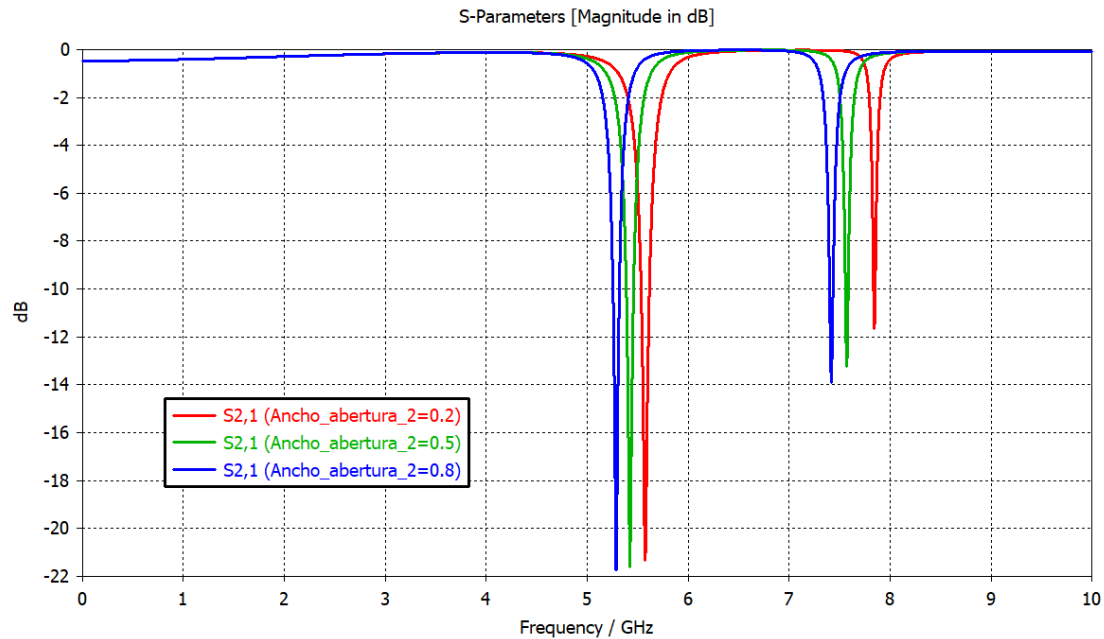


Figura 4.16.Efecto de variar el ancho de la segunda abertura.

El quinto y sexto parámetro por variar son los anchos de las aberturas de cada brazo metálico como se aprecia en las figuras 4.17 y 4.18. En la figura 4.17 se han tenido en cuenta unos valores de 2 mm, 3.6 mm, 4 mm y en la figura 4.8 se han tenido en cuenta los valores de 2 mm, 2.8 mm y 3.5 mm.

En ambas figuras se aprecia que el aumentar este valor crea un desplazamiento hacia bandas inferiores en ambas bandas. En lo que respecta a la atenuación, a mayor valor de este parámetro, mayor atenuación en la segunda banda, sobre la primera no se aprecia efecto alguno.

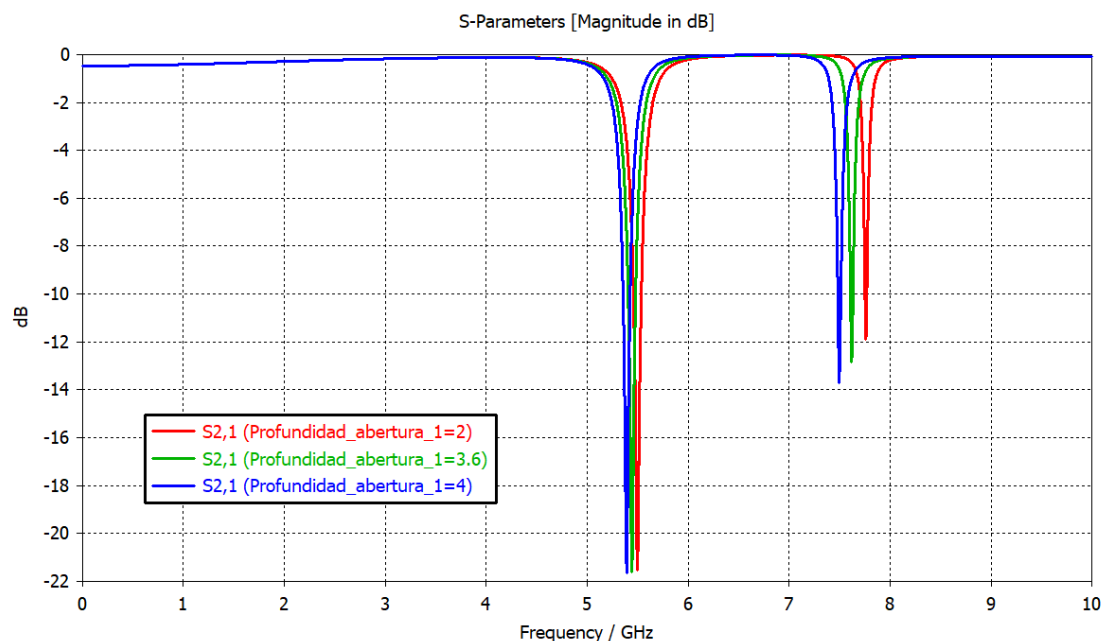


Figura 4.17.Efecto de variar la profundidad de la primera abertura.

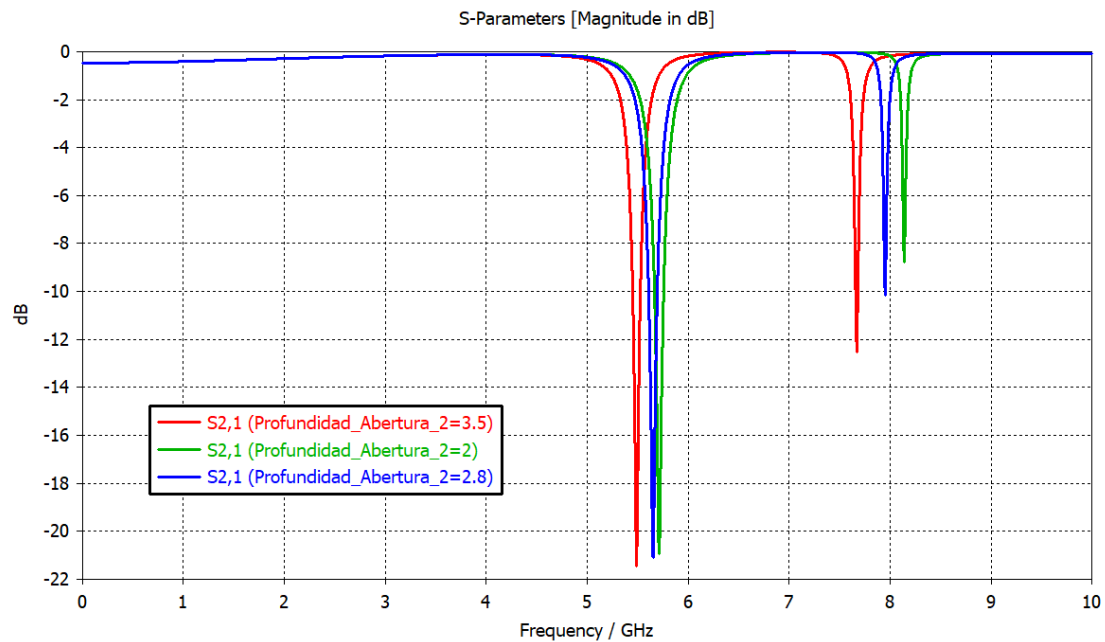


Figura 4.18.Efecto de variar la profundidad de la segunda abertura.

Por último en la figura 4.19 se muestra las pérdidas de inserción de nuestro filtro de dos bandas con las dimensiones elegidas al inicio. Como se aprecia se ha conseguido eliminar frecuencias muy cercanas a lo marcado como objetivo, concretamente se ha conseguido filtrar frecuencias a 5.42 GHz y 7.5 GHz. Además la profundidad de las pérdidas de inserción están por debajo de los -10 dB.

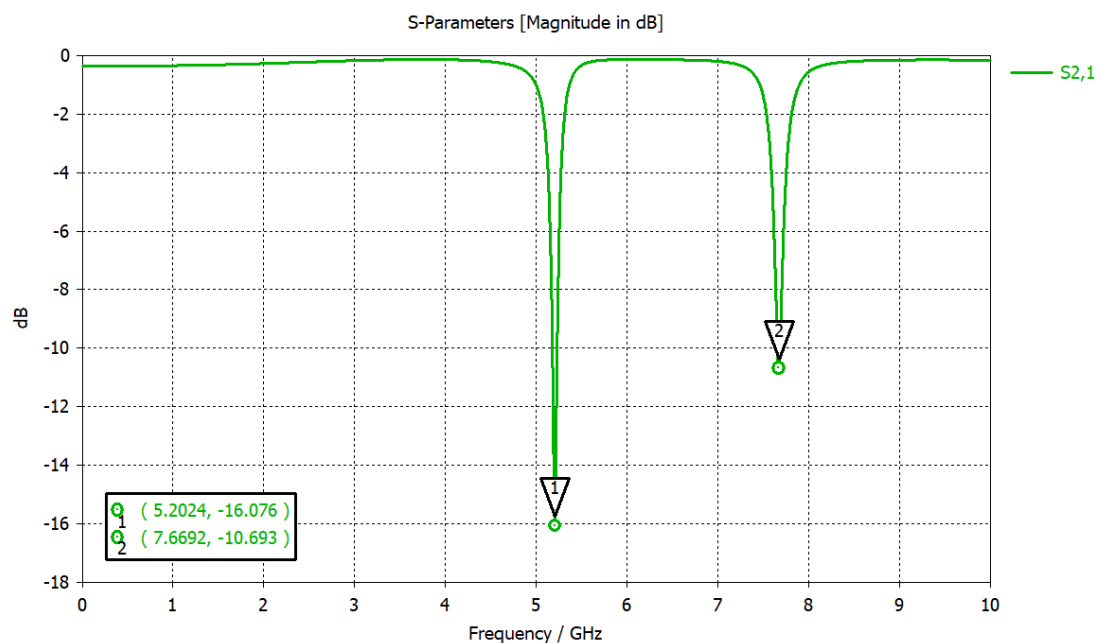


Figura 4.19.Pérdidas de inserción con las dos bandas de frecuencia propuestas.

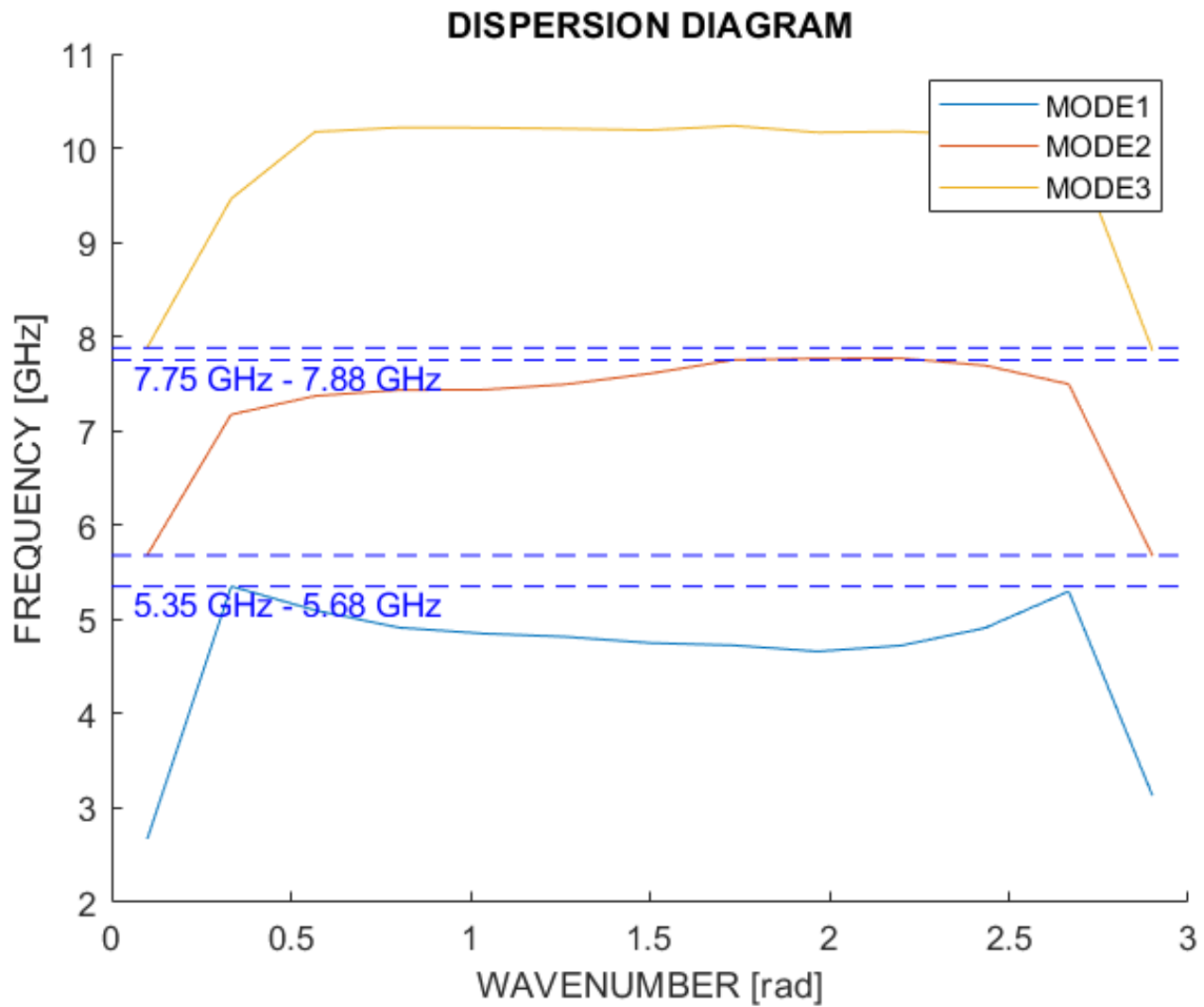


Figura 4.20. Diagrama de dispersión del filtro propuesto.

Además del resultado final visto en la figura 4.19, se hace un breve estudio sobre el efecto de agregar aberturas o ranuras. Para ello se prepara una celda EBG con unas ciertas dimensiones de anchura y altura a la cual se le irá añadiendo ranuras.

Se empieza con una celda unitaria con una ranura como se muestra en la figura 4.21. En esta figura se muestra la posición de la vía que no se moverá en todas las pruebas aunque se añadan ranuras más adelante.

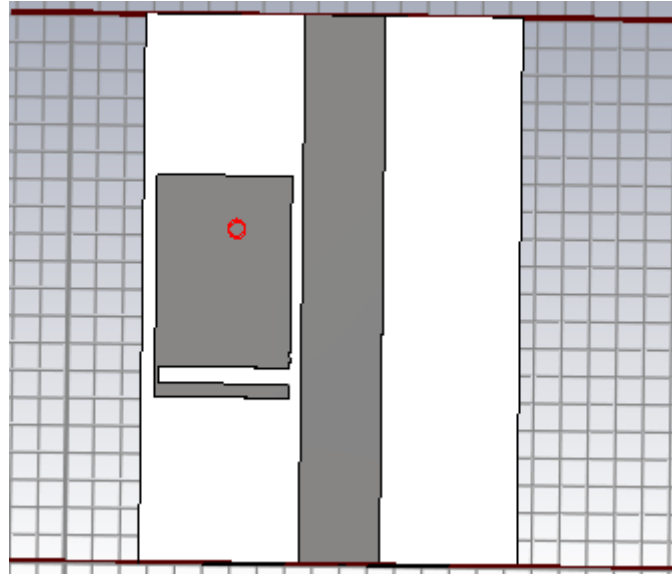


Figura 4.21 Celda EBG con una ranura

En la figura 4.22 se muestran las pérdidas de inserción del modelo de la figura 4.21.

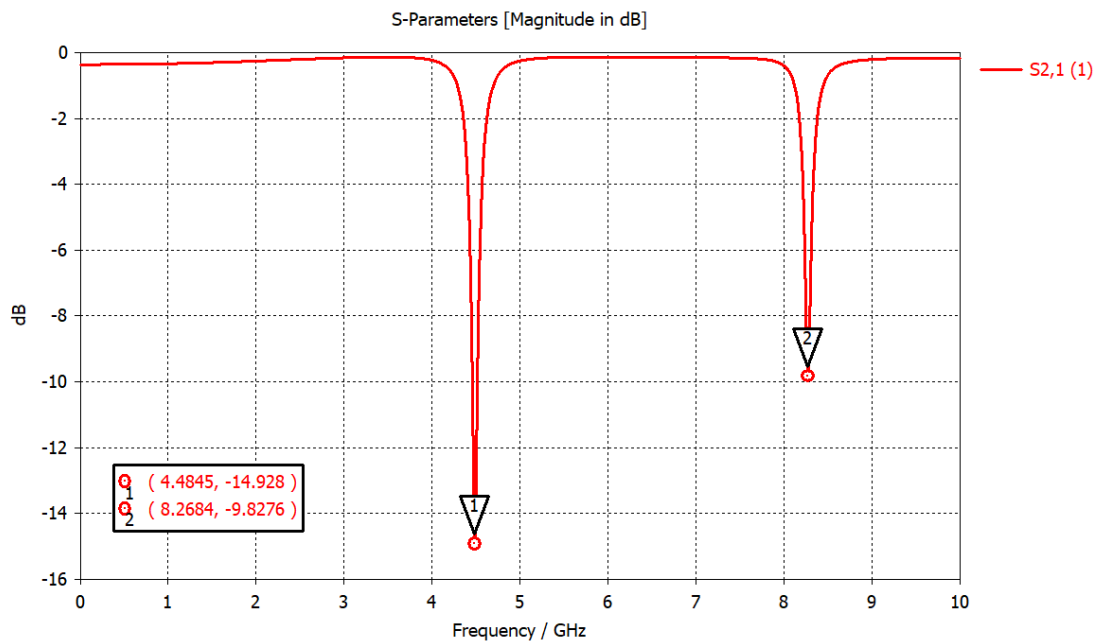


Figura 4.22 Parámetro S21 de la celda EBG con una ranura

Se agrega una segunda ranura sin modificar las dimensiones (altura y anchura) de la estructura EBG como se aprecia en la figura 4.23.

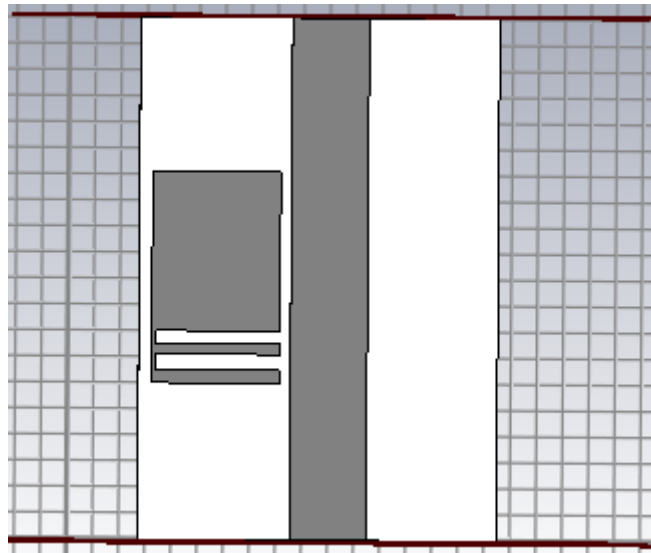


Figura 4.23 Celda EBG con dos ranuras

La figura 4.24 muestra las pérdidas de inserción del modelo con dos ranuras de la figura 4.23.

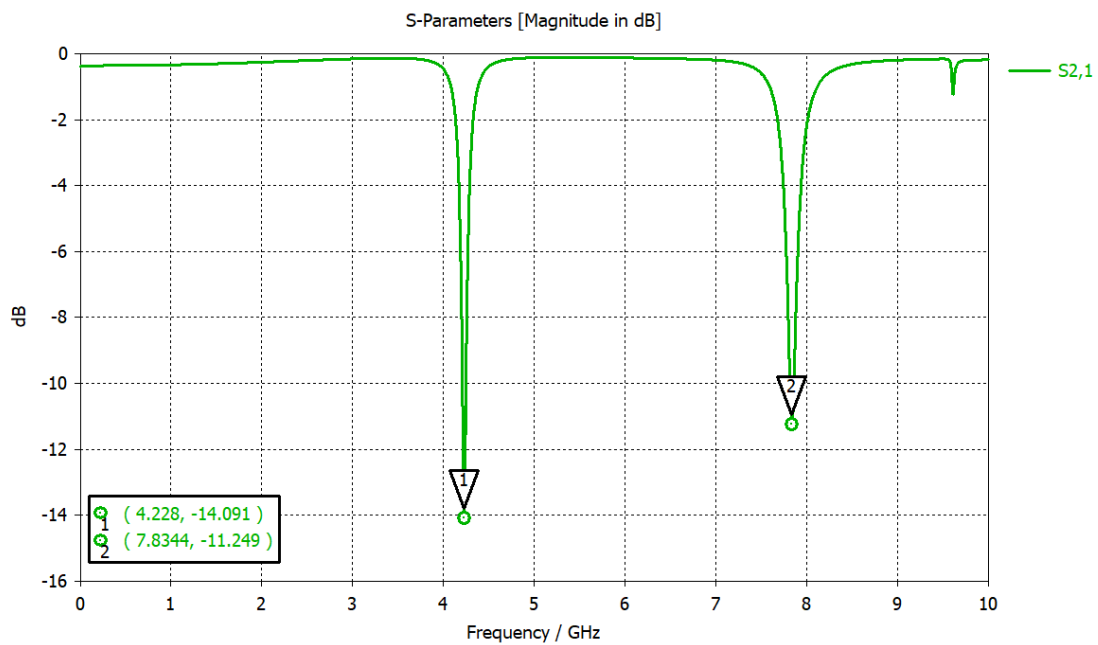


Figura 4.24 Parámetro S21 de la celda EBG con dos ranuras

Por último, se agrega una tercera ranura a la estructura tal como se aprecia en la figura 4.25.

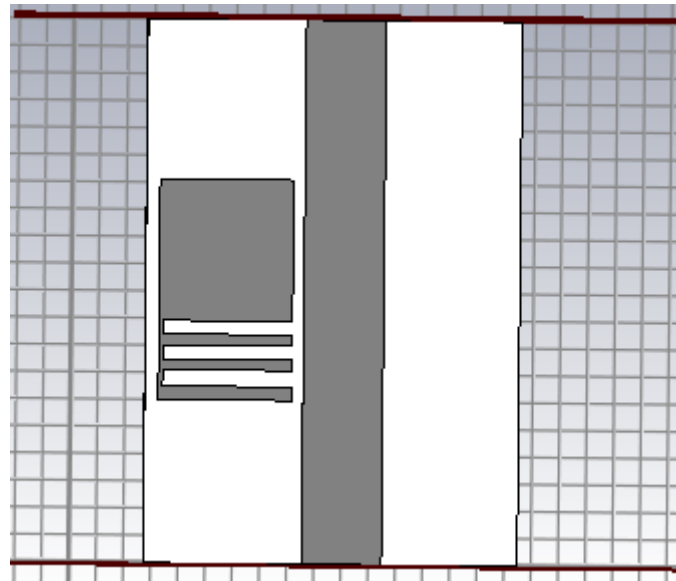


Figura 4.25 Celda EBG con tres ranuras

La figura 4.25 muestra las pérdidas de inserción del modelo con dos ranuras de la figura 4.26.

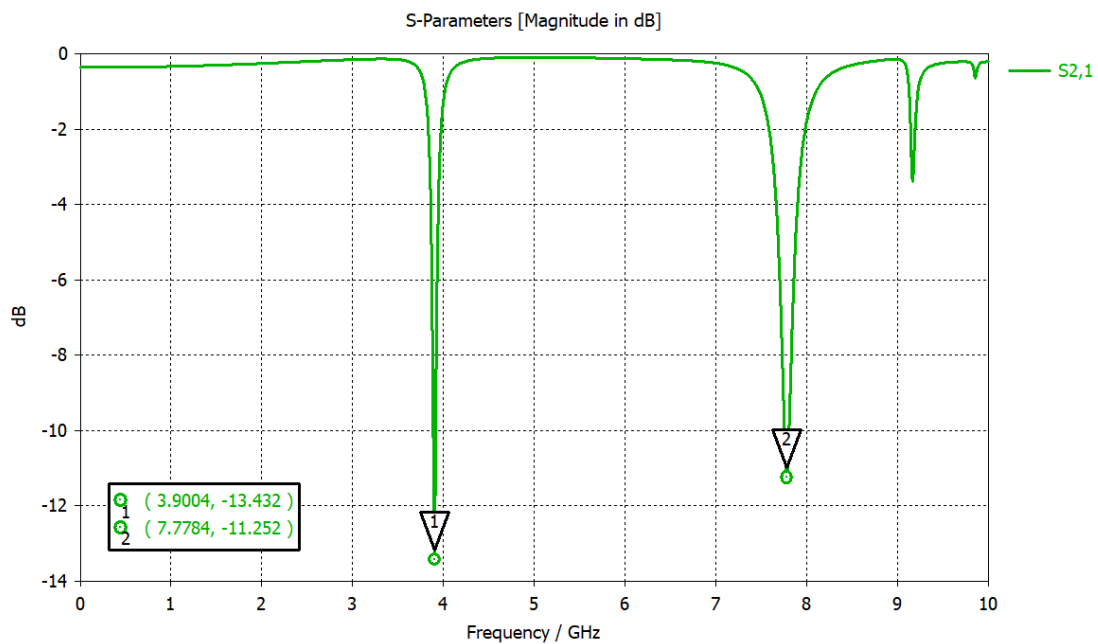


Figura 4.26 Parámetro S21 de la celda EBG con tres ranuras

Con estas simulaciones se procede a resumir estos resultados en la tabla 4.1

	Filtro con una abertura	Filtro con dos aberturas	Filtro con tres aberturas
Frecuencia 1° banda	4.48 GHz	4.228 GHz	3.9 GHz
Frecuencia 2° banda	8.2 GHz	7.8 GHz	7.77 GHz
S21 (1° banda)	-14.92 dB	-14.091 dB	-13.432 dB
S21 (2° banda)	-9.82 dB	-11.249 dB	-11.252 dB

Tabla 4.1 Valores de frecuencia y profundidad para una celda con una abertura dos y tres.

Como se aprecia en la tabla 4.1, el ir creando más aberturas en una estructura EBG lo que hace es crear un desplazamiento hacia frecuencias inferiores en la primera banda, teniendo más notoriedad en esta. La segunda también sufre un desplazamiento hacia frecuencias inferiores pero en pasos de frecuencia más pequeños a medida que aumenta el número de aberturas.

Sobre la atenuación se destaca que el hecho de aumentar el número de aberturas reduce un poco la atenuación de la primera banda y aumenta, también ligeramente, la atenuación de la segunda.

En resumen, el agregar ranuras o aberturas nos puede ayudar a sintonizar mejor el valor de la primera banda de frecuencia, reduciéndolo o aumentándolo. Solo para el caso de querer desplazar las frecuencias de corte hacia valores inferiores sin crear más aberturas nos llevaría a aumentar las dimensiones de la estructura EBG, aunque esto claramente afectaría a las dos bandas de frecuencia. Luego modificando los otros parámetros característicos de la estructura EBG se puede llegar a conseguir los mismos efectos de variar la primera banda sin afectar demasiado a la segunda. Aunque, esto nos lleva a un aumento en las dimensiones de la celda EBG, por lo que si el tamaño es un factor crítico como sucede en este trabajo, crear aberturas puede ayudar a desplazar frecuencias hacia valores inferiores, en concreto la primera banda, sin aumentar las dimensiones.

4.3 FILTRO DE FRECUENCIAS A 3.5 GHz y 7.5 GHz

Para este modelo en particular se quiere obtener dos bandas de frecuencias más separadas entre sí, se usará lo mencionado al final del apartado 4.2 y es que agregar más ranuras o aberturas a la celda unitaria EBG nos permitirá desplazar las dos frecuencias a valores menores de frecuencia pero dando saltos más grandes en la primera banda, separando así más y más estas dos bandas, lo cual nos puede resultar conveniente en este caso.

Para este caso se han creado varias variables que se reflejan en la figura 4.27. Las dimensiones de cada uno es la siguiente: el parámetro “anchura EBG” tiene un valor de 4.9 mm, el parámetro “altura EBG” tiene un valor de 8.1 mm, el parámetro “ancho de abertura 1” tiene un valor de 0.6 mm, el parámetro “ancho de abertura 2” tiene un valor de 0.5 mm, el parámetro “ancho de abertura 3” tiene un valor de 0.5 mm, el parámetro “ancho de abertura 4” tiene un valor de 0.5 mm, el parámetro “profundidad abertura” tiene 4 valores distintos empezando desde el brazo que se encuentra más por debajo, estos valores son 4.75 mm, 4.75 mm, 4.5 mm y 4.5 mm en el último brazo.

En lo que respecta al sustrato, se ha elegido el Taconic RF-35 para simular con un espesor de 1.524 mm. La vía tiene un radio de 0.3 mm y se encuentra ubicada a 6.2 cm de la celda unitaria respecto al eje vertical midiendo desde la parte inferior y a 2 mm en el eje horizontal midiendo desde el lado de la celda unitaria que está cerca de la línea de transmisión.

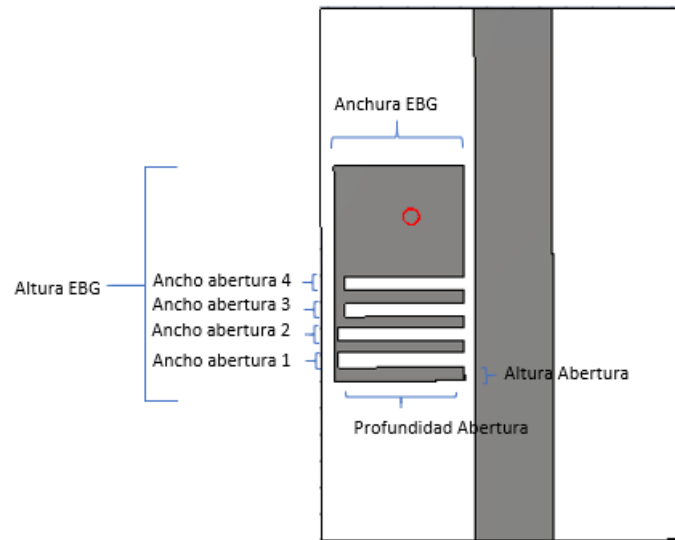


Figura 4.27. Modelo EBG para obtener un filtro en bandas 3.5 GHz y 7.5 GHz.

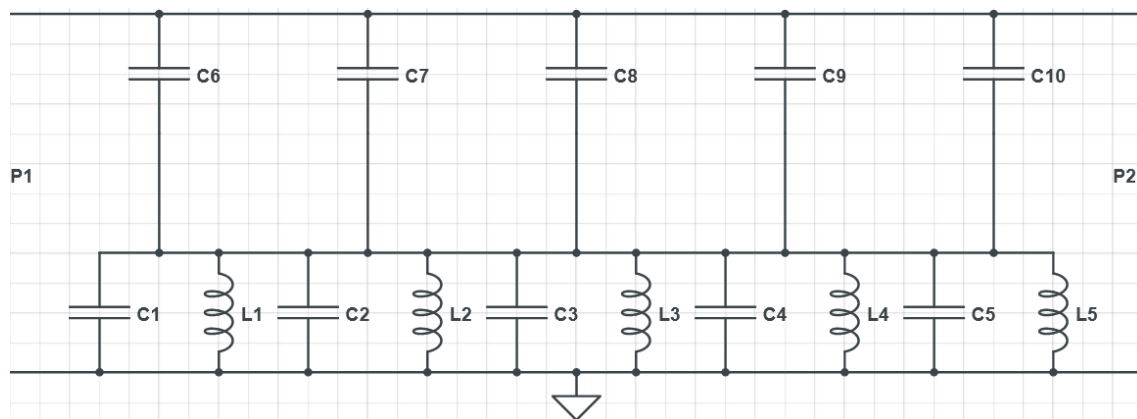


Figura 4.28. Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión.

La figura 4.28 muestra el circuito equivalente de la celda unitaria con 4 brazos metálicos a simular. Como ya se ha explicado en los dos primeros filtros, los 4 modelos LC de la derecha después de L1 y C1 representan los brazos metálicos que se agregan a la celda unitaria y la capacitancia extra representa el gap entre cada brazo.

El primer parámetro con el que probar distintos valores es “profundidad abertura 1” o la primera profundidad empezando por la parte inferior.

Como se mostró en el capítulo 4, apartado 2, el variar este parámetro afecta solo a la segunda banda, aumentar su valor hace que la frecuencia se desplace hacia zonas inferiores de frecuencia.

Como el efecto es el mismo en las 4 ranuras, aquí se adjuntan solo las dos primeras, siendo la figura 4.29 la que muestra los resultados de variar la ranura que se encuentra abajo del todo y la figura 4.30 la que muestra los resultados de la ranura que está por encima de la primera ranura.

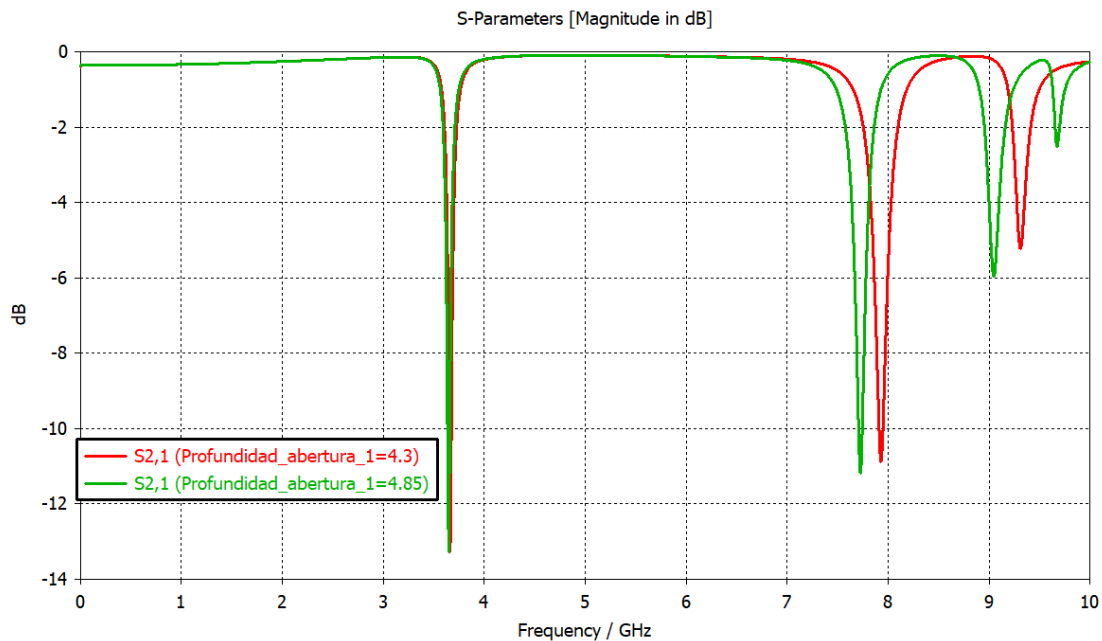


Figura 4.29.Efecto de variar la profundidad de la primera abertura.

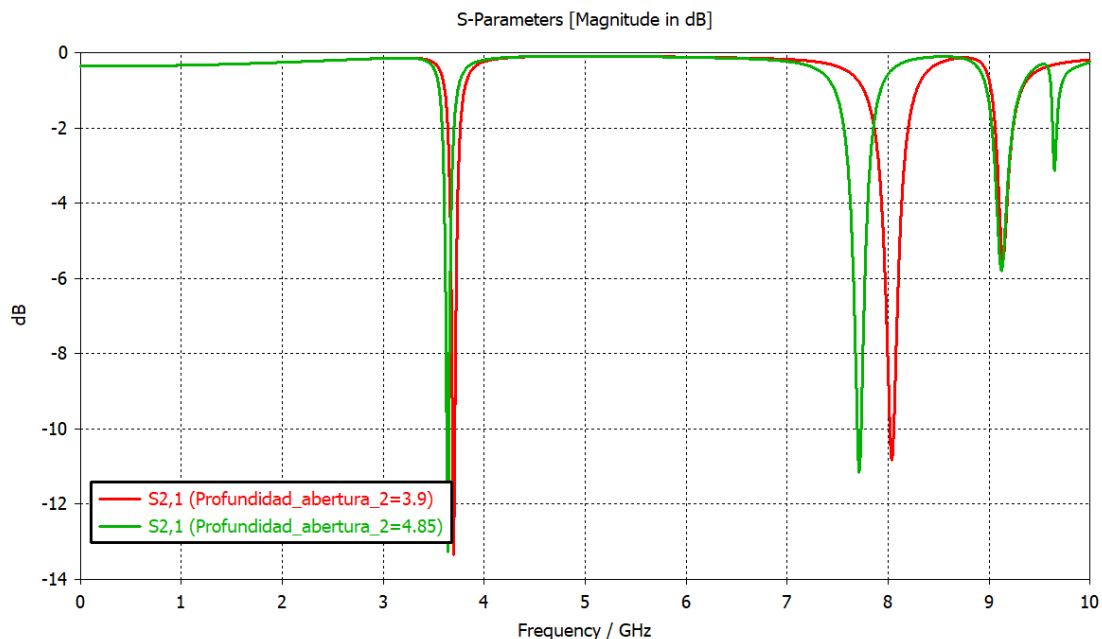


Figura 4.30.Efecto de variar la profundidad de la segunda abertura.

El segundo parámetro que se tiene en cuenta en este análisis es el radio que define el diámetro de la vía que conecta la cara top con el plano de tierra. Aumentar su valor aumenta la inductancia y por ende crea un desplazamiento de frecuencia a la izquierda en general, es decir en la primera y la segunda banda como se ha visto anteriormente.

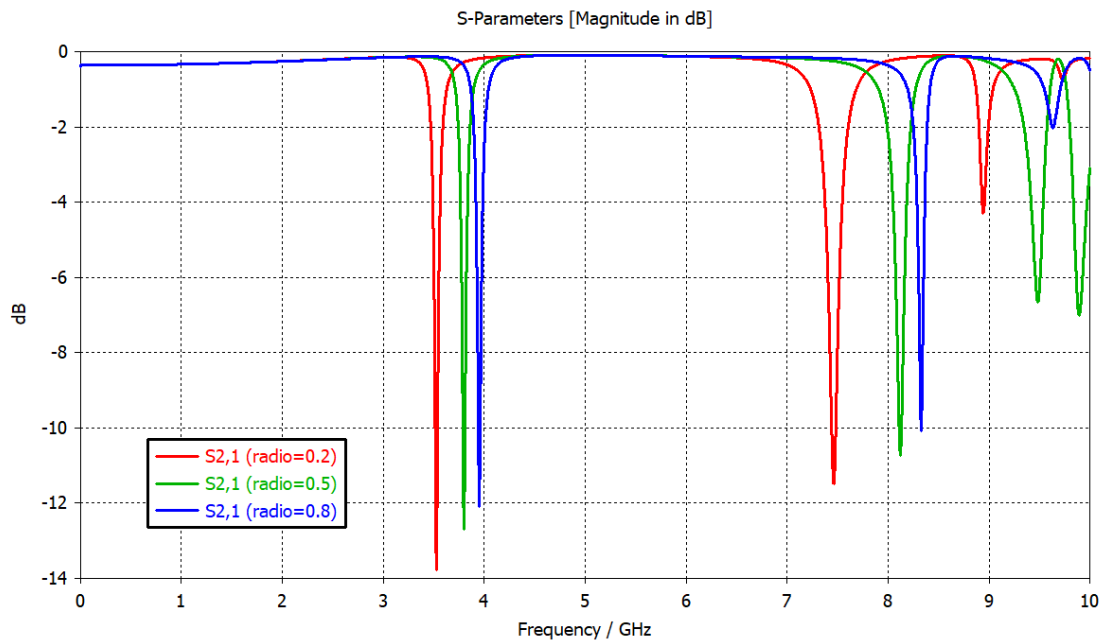


Figura 4.31.Efecto de variar el radio.

El tercer parámetro para variar es la anchura y sus resultados se muestran en la figura 4.32. Como se aprecia este parámetro nos permite controlar ligeramente la primera banda y no tiene ningún efecto en la segunda.

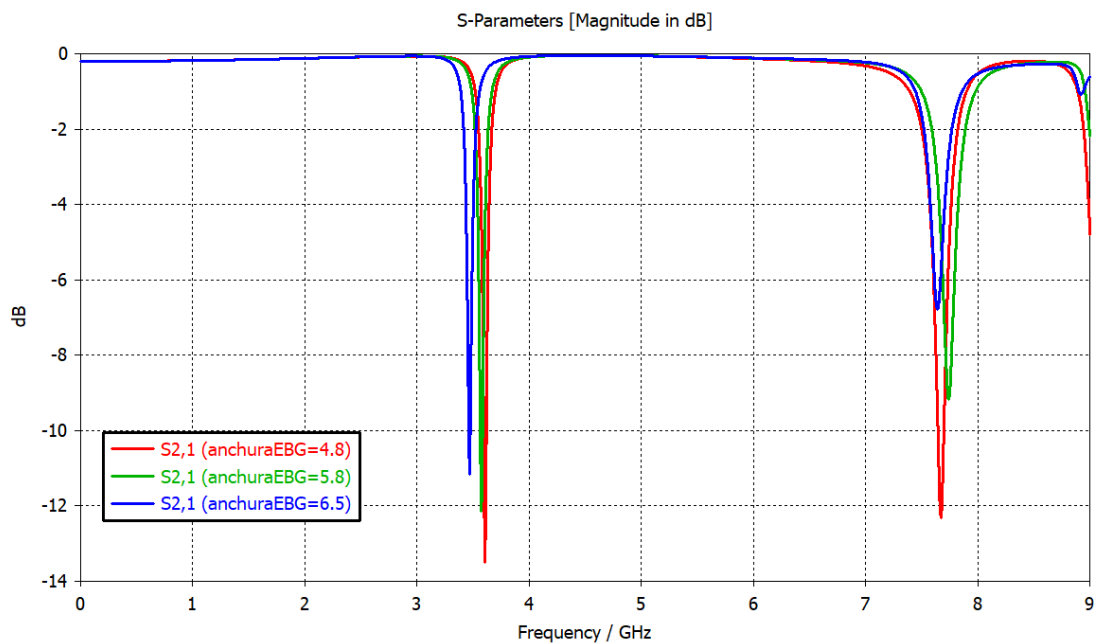


Figura 4.32.Efecto de variar la anchura EBG.

El cuarto parámetro afecta a las dimensiones de la celda unitaria de forma cuadrada/rectangular. El aumentar este valor crea un desplazamiento hacia frecuencias inferiores en la segunda banda, no tiene efecto en la primera banda. Respecto a la atenuación esta se mantiene aunque el valor de este parámetro aumente o disminuya.

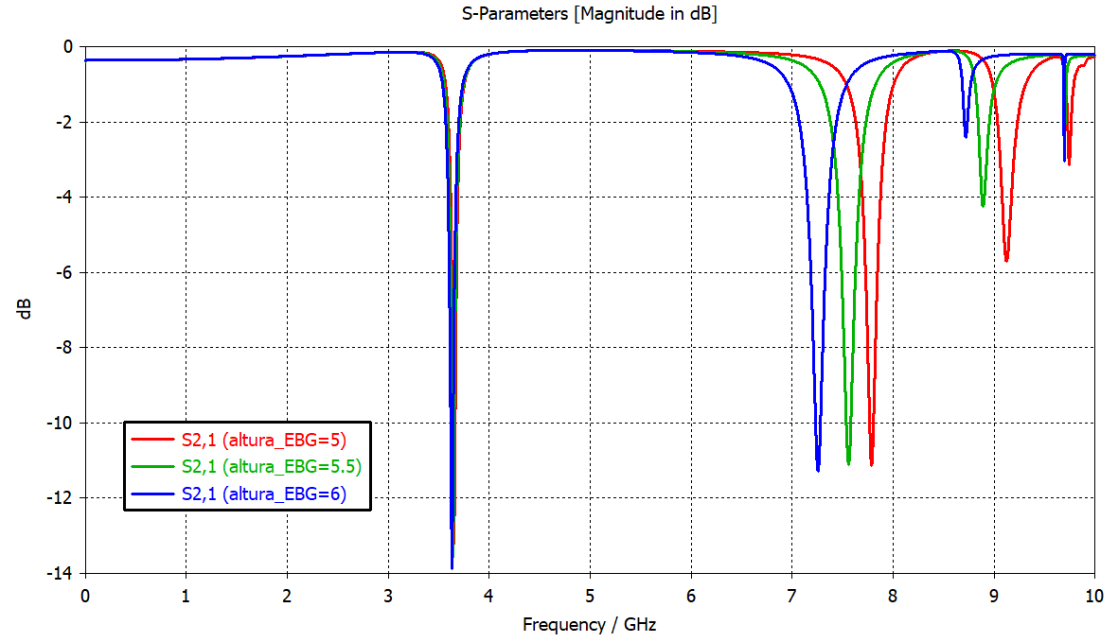


Figura 4.33.Efecto de variar la altura EBG.

Por último se muestra las pérdidas de inserción de nuestro filtro de dos bandas en las frecuencias cercanas a 3.5 GHz y 7.5 GHz en la figura 4.34, como se aprecia, se ha conseguido eliminar bandas de frecuencia muy cercana a lo buscado aunque la profundidad roce el mínimo puesto en este trabajo.

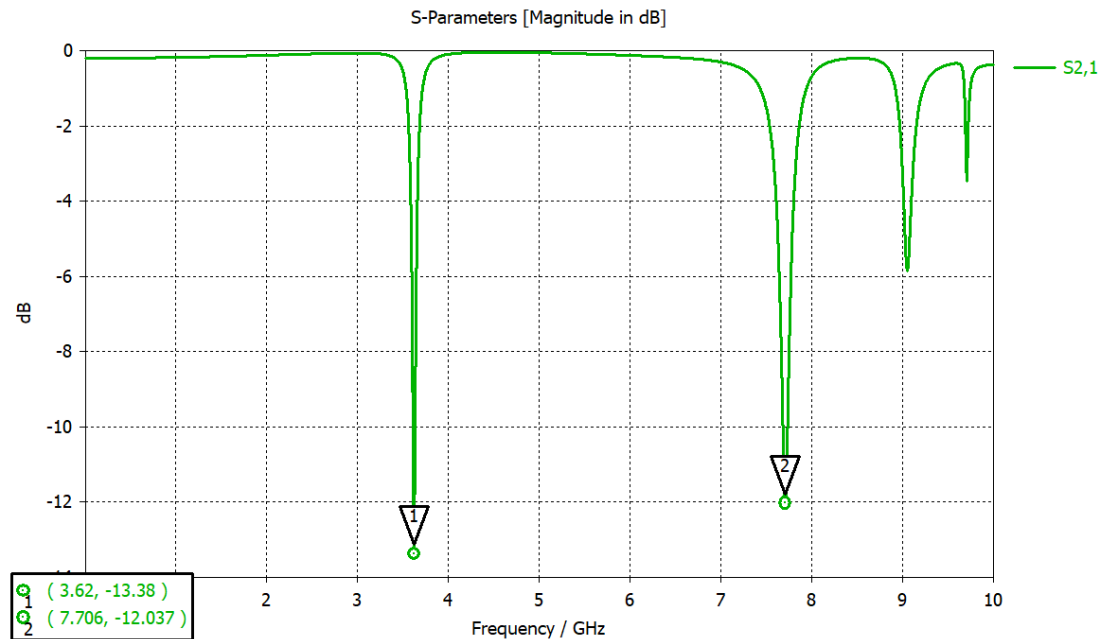


Figura 4.34. Perdidas de inserción con las dos bandas de frecuencia propuestas.

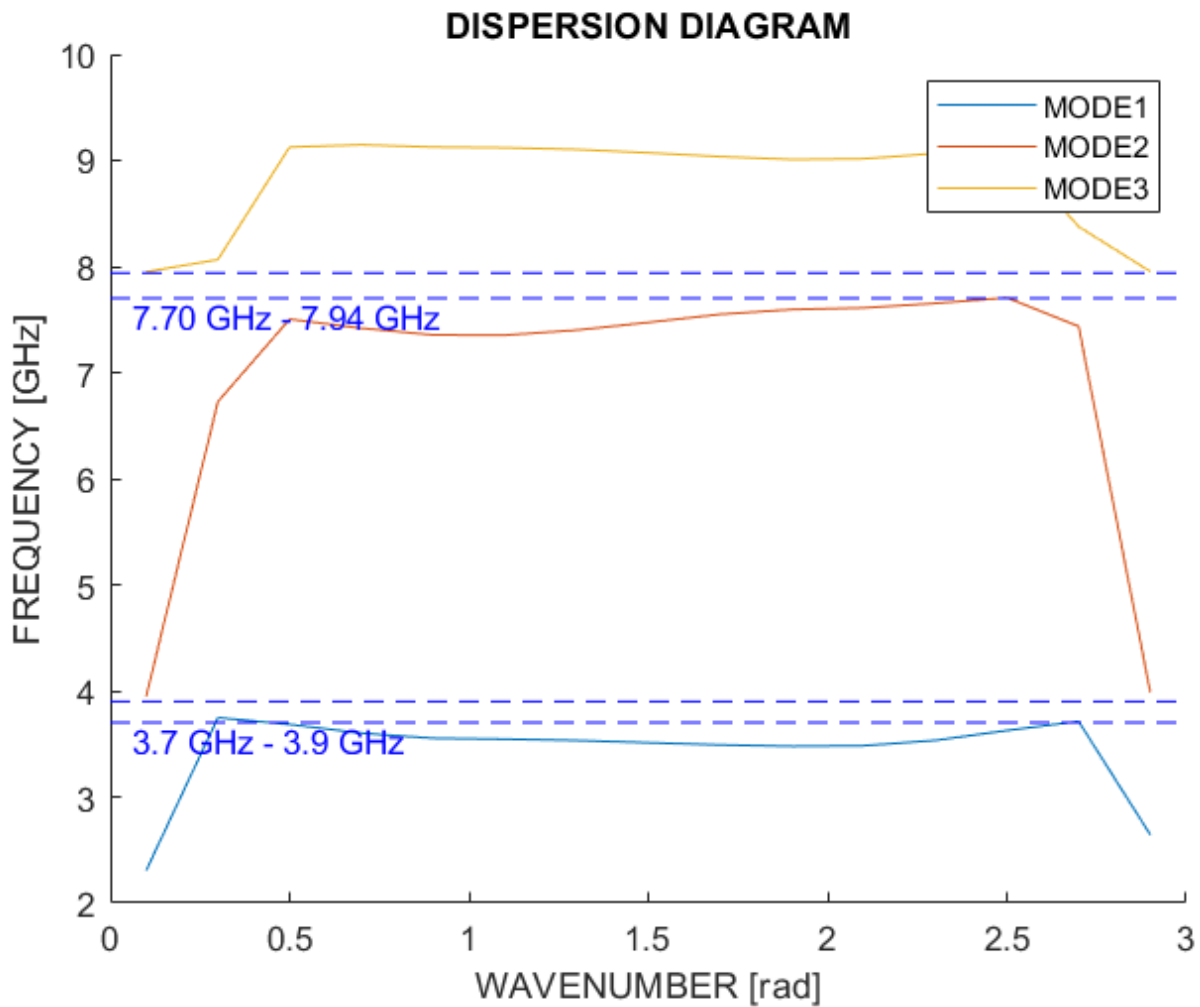


Figura 4.35. Diagrama de dispersión del filtro propuesto.

En la figura 4.35 se muestra el diagrama de dispersión para el filtro propuesto en este apartado, donde las frecuencias mostradas en este diagrama son muy cercanas a las obtenidas en las pérdidas de inserción de la figura 4.34.

4.4 FILTRO DE FRECUENCIAS A 3 BANDAS: 3.5 GHz, 5.5 GHz y 7.5 GHz

En este último modelo se ha optado por una nueva forma de celda unitaria EBG. Se ha creado dos aberturas simétricas dentro de la celda unitaria y se han realizado varias simulaciones consiguiendo así tres bandas de frecuencia a eliminar cercanos a las frecuencias objetivo de 3.5 GHz, 5.5 GHz y 7.5 GHz.

Los valores finales de los parámetros mostrados en la figura 4.36 son “altura_EBG”=10.5 mm, “anchura_EBG” = 9.8 mm, “abertura” =0.4 mm, “posición_abertura” =0.7mm y “abertura_brazos”=0.25 mm.

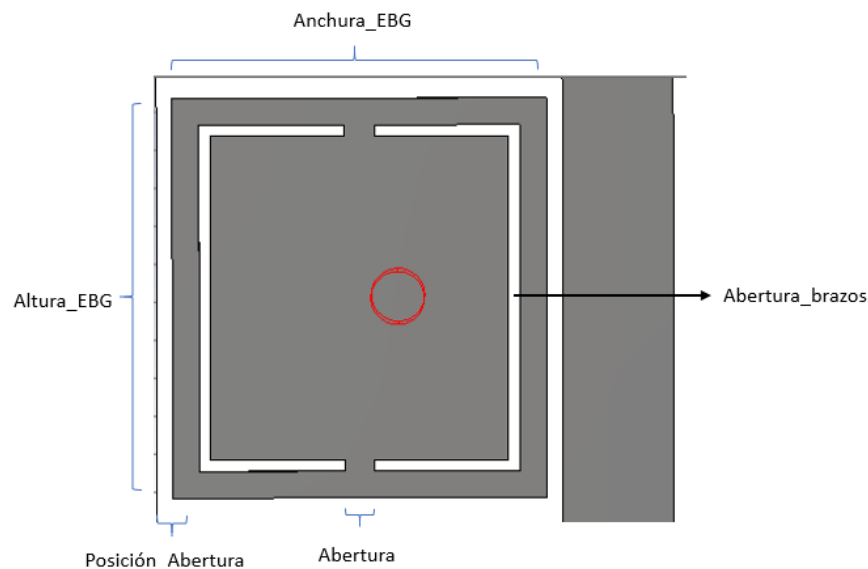


Figura 4.36. Modelo EBG para obtener un filtro en bandas 3.5 GHz, 5.5 GHz y 7.5 GHz.

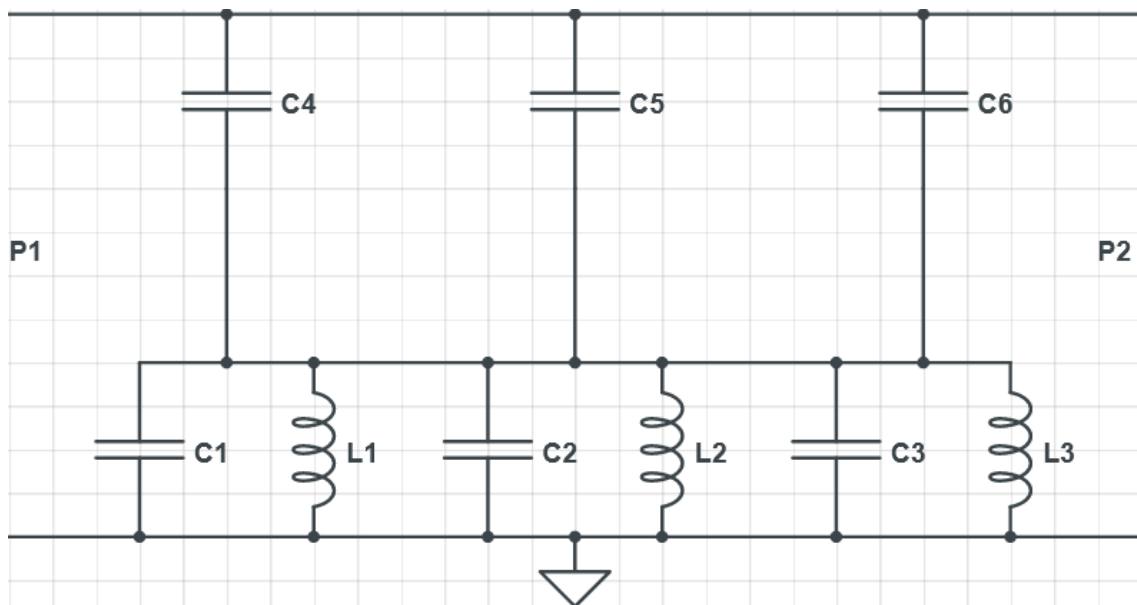


Figura 4.37. Circuito equivalente del modelo EBG en cuestión.

En la figura 4.37 se representa el modelo equivalente a nivel de circuitos de la estructura EBG a simular. El primer parámetro sobre el cual se hacen pruebas es la variable “abertura” que lo que nos indica es cuanta separación hay entre las dos ranuras creadas dentro de la celda EBG, estas simulaciones se reflejan en la figura 4.38. El aumentar de valor este parámetro crea un desplazamiento hacia frecuencias inferiores en las dos primeras bandas pero teniendo más impacto en la segunda. Lo mismo sucede con la atenuación, donde su valor máximo aumenta notablemente en la segunda banda.

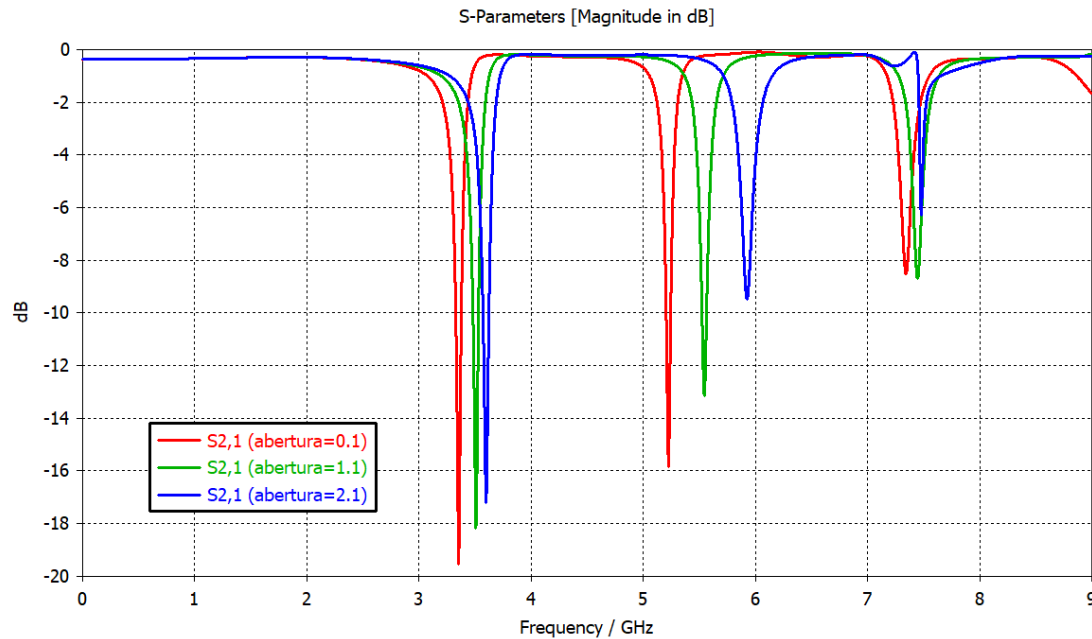


Figura 4.38.Efecto de variar la abertura.

El segundo parámetro por variar es la altura de la celda unitaria. Estos resultados se muestran en la figura 4.39 donde se aprecia que a medida que este valor aumenta todas las frecuencias son desplazadas hacia valores inferiores de frecuencia.

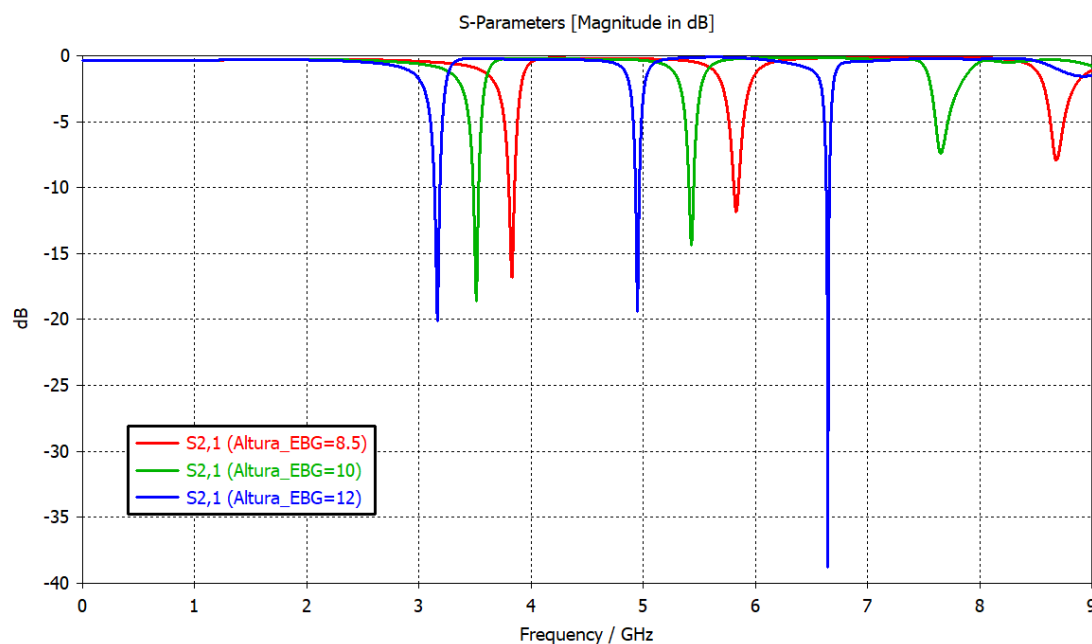


Figura 4.39.Efecto de variar la altura de la celda EBG.

El tercer parámetro por variar es la anchura de la celda unitaria mostrado en la figura 4.40, en general aumentar el valor de este parámetro nos ocasiona un desplazamiento hacia zonas bajas de frecuencia.

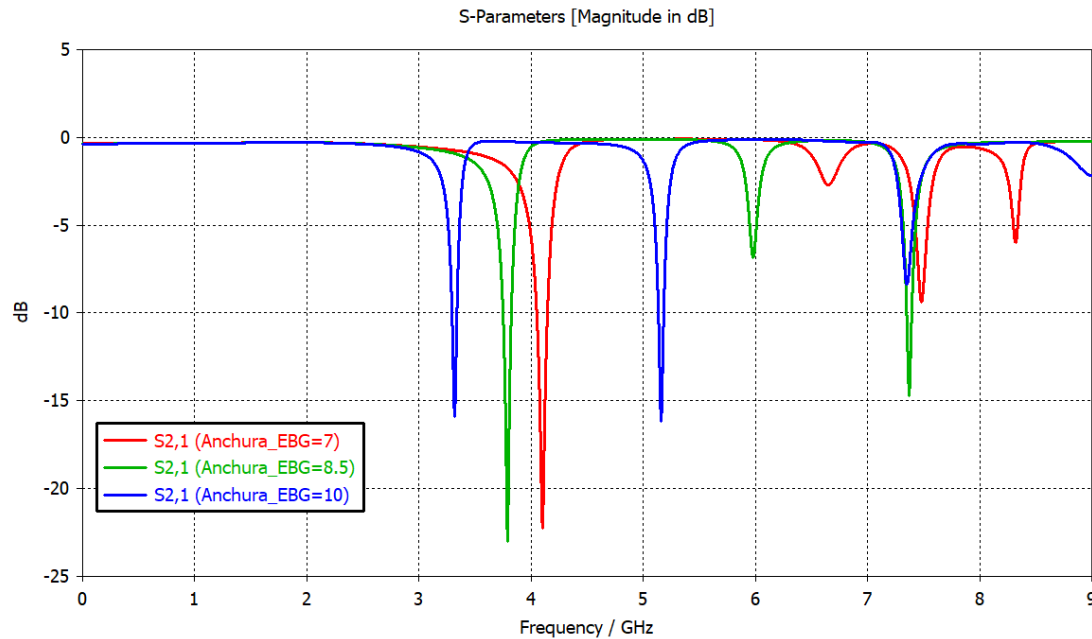


Figura 4.40.Efecto de variar la anchura de la celda EBG.

El cuarto parámetro por variar es la posición de la abertura, que indica, que tan cercanos a los extremos de la celda unitaria se encuentran las dos aberturas. Estos resultados se muestran en la figura 4.41. Este parámetro nos permite variar notablemente solo la segunda banda de frecuencia.

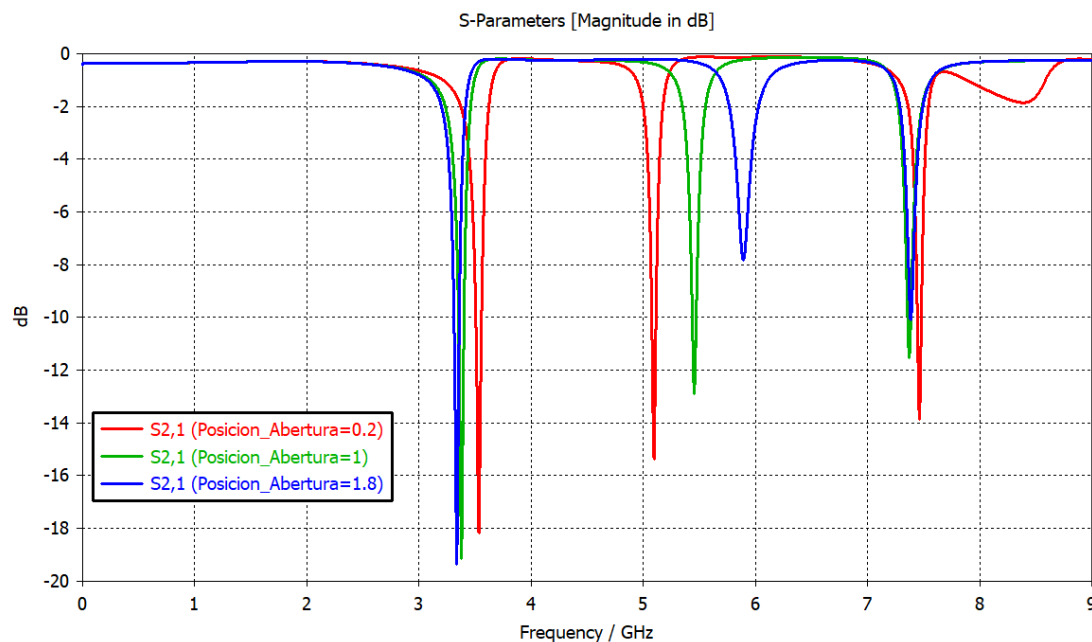


Figura 4.41.Efecto de variar la posición de la abertura.

El quinto parámetro por variar es el radio de la celda unitaria, estos resultados se exponen en la figura 4.42. A medida que este parámetro aumenta de valor, la frecuencia en la primera banda se desplaza hacia frecuencias mayores. Por tanto este parámetro nos permite controlar la primera banda.

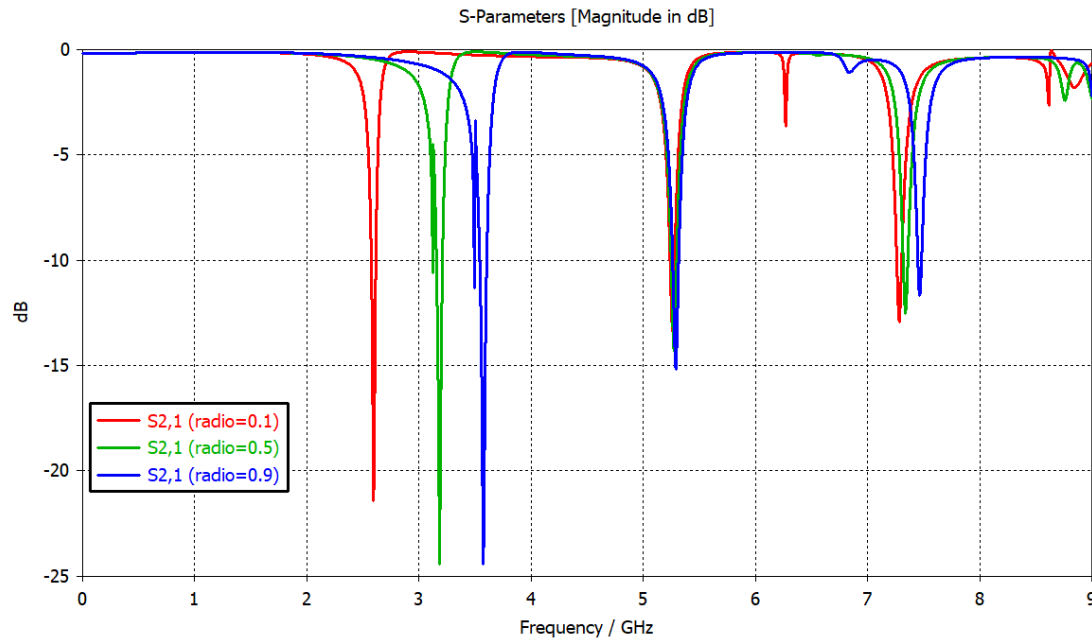


Figura 4.42.Efecto de variar el radio.

El sexto parámetro por variar es la posición de la vía y sus resultados se muestran en la figura 4.43. Para entender mejor el efecto físico que tiene variar estos parámetros se sigue la siguiente regla, valores negativos de este parámetro indican un desplazamiento de la vía en el eje Y hacia abajo, mientras valores positivos indican un desplazamiento de la vía hacia arriba. Por tanto, lo que nos indica la figura 4.43 es que a medida que la posición de la vía se aleja de la posición central, la tercera banda aumenta en frecuencia.

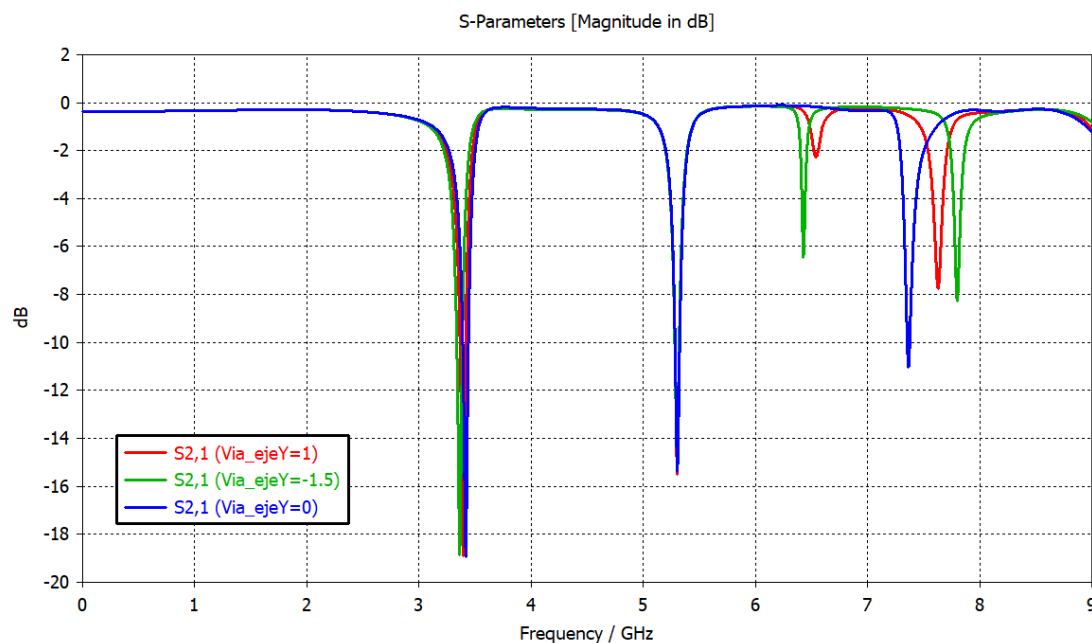


Figura 4.43.Efecto de variar el radio según su posición en el eje Y.

En la figura 4.44 nos muestran los resultados de variar la posición de la vía en el eje X. Como se aprecia parámetros nos permite variar ligeramente la primera banda de frecuencia.

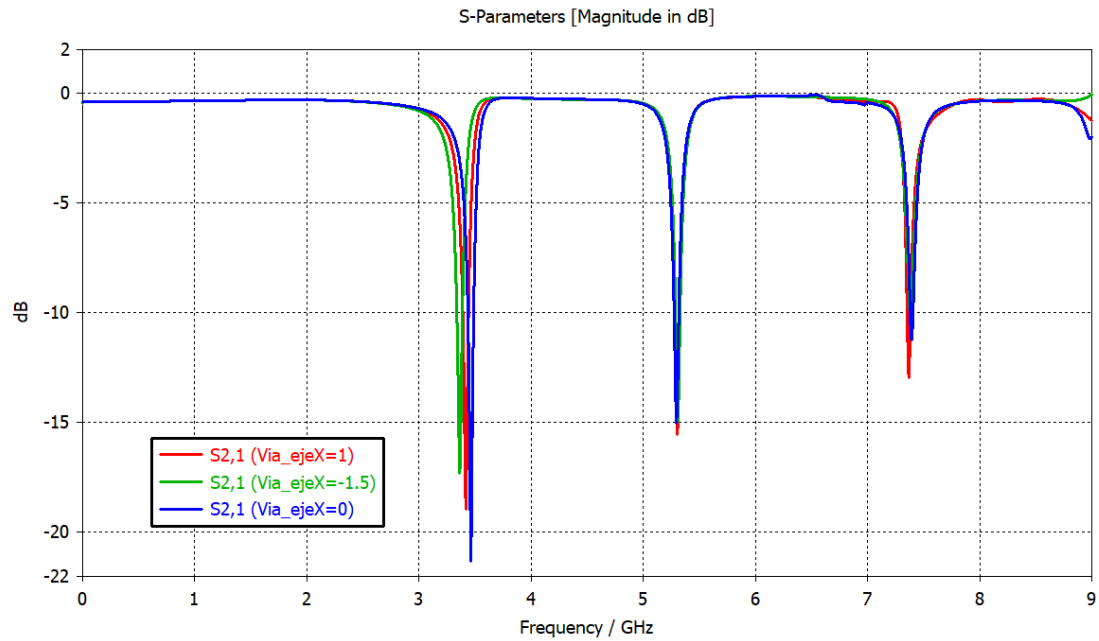


Figura 4.44.Efecto de variar el radio según su posición en el eje X.

Por último, después de varias pruebas se muestran en la figura 4.45 los resultados finales conseguidos. Concretamente se han obtenido 3 bandas de frecuencia a 3.37 GHz, 5.3 GHz y 7.37 GHz con unos valores de profundidad de -19.4 dB, -15.14 dB y -14.735 dB respectivamente.

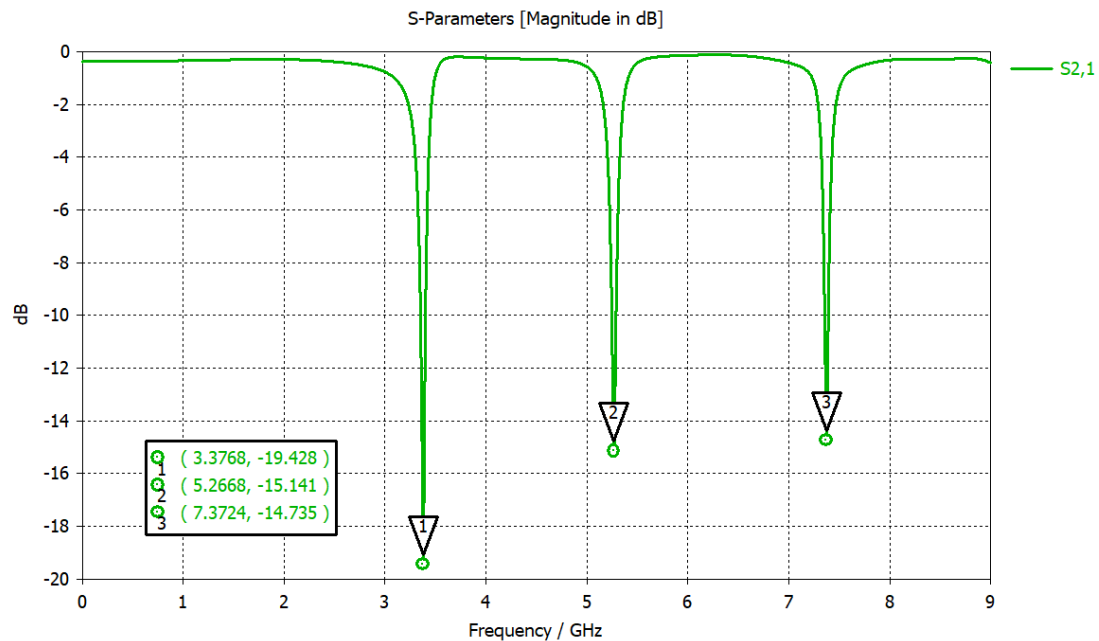


Figura 4.45.Perdidas de inserción con las tres bandas de frecuencia propuestas.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

El diseño de varias estructuras EBG que filtren frecuencias alrededor de las bandas de 3.5 GHz, 5.5GHz y 7.5 GHz, con un rechazo de -10 dB como máximo o valor límite y con un estrecho ancho de banda han sido presentados. Estos diseños, por ejemplo el de 3.5 GHz como primera banda puede ser usado para filtrar señales de la tecnología WiMAX o antenas de Wireless con estas frecuencias de operación, lo que puede venir bien en el futuro despliegue de 5G en la que se usará como banda principal, la banda de 3.5 GHz.

En la banda de los 5.5 GHz se podría filtrar señales del estándar 802.11 para frecuencias inalámbricas, concretamente la 802.11a que funciona desde los 5.1 GHz a los 5.9 GHz. Para la banda cercana a los 7.5 GHz podemos eliminar frecuencias usadas para comunicaciones por satélite como es el caso de la televisión satelital que funciona en la banda X con un Downlink de 7.2 GHz – 7.74 GHz y un Uplink de 7.9 GHz - 8.3 GHz.

Estos diseños han tenido en cuenta los valores de fabricación de los que se disponía en los laboratorios, tales como un sustrato FR35 con un espesor de 1.524 mm y una limitación en la separación con un valor mínimo entre aberturas o separaciones de 2 mm para fabricar la estructura. Cada modelo EBG conseguido se ha realizado teniendo en cuenta la línea de transmisión y esto es así para tener en cuenta la soldadura con conector SMA o conector coaxial de radio frecuencia para poder realizar medidas.

Creados los diseños en la herramienta de simulación, también se ha enseñado el cómo crear un entorno de simulación para obtener los respectivos diagramas de dispersión e ir optimizando este para intentar conseguir resultados lo más parecido posibles en frecuencia a los reflejados en nuestras pérdidas de inserción.

Los resultados de cada estructura EBG usados en el capítulo 4 se resumen en la tabla 5.1, en esta tabla se muestra el valor de las frecuencias conseguidas en determinadas bandas y las pérdidas de inserción correspondiente a dichas bandas.

	Primer Filtro (3.5GHz- 5.5GHz)	Segundo Filtro (5.5GHz- 7.5GHz)	Tercer Filtro (3.5GHz- 7.5GHz)	Cuarto Filtro (3.5GHz- 5.5GHz- 7.5GHz)
Primera Banda	3.66 GHz	5.25 GHz	3.654 GHz	3.38 GHz
Segunda Banda	5.55 GHz	7.66 GHz	7.787 GHz	5.3 GHz
Tercera banda	N/A	N/A	N/A	7.37 GHz
 S21 1º banda	-17.096 dB	-16.076 dB	-13.188 dB	-19.43 dB
 S21 2º banda	-16.527 dB	-10.693 dB	-11.126 dB	-15.149 dB
 S21 3º banda	N/A	N/A	N/A	-14.781 dB
Ancho de banda de la 1º banda	38.5 MHz	7 MHz	22.5 MHz	49.9 MHz
Ancho de banda de la 2º banda	43.3 MHz	16.5 MHz	38.7 MHz	42.3 MHz
Ancho de banda de la 3º banda	N/A	N/A	N/A	35.5 MHz

Tabla 5.1 Valores obtenido de las simulaciones de cada filtro

Sobre los parámetros que controlan las determinadas bandas en cuestión, estos se muestran en la tabla 5.2.

	Parámetros para el control de bandas			
	Primer Filtro	Segundo Filtro	Tercer Filtro	Cuarto Filtro
Primera banda	Altura_apertura	Anchura_EBG	Anchura_EBG	radio
Segunda banda	Radio, profundidad_abertura	Altura_EBG	Profundidad_abertura, altura EBG	abertura
Tercera banda	N/A	N/A	N/A	Posición vía eje Y

Tabla 5.2 Parámetros que nos permiten controlar determinadas bandas en cada filtro

Finalmente, se ha fabricado 3 tipos de modelos de estructura EBG a través de ficheros gerber obtenidos en CST y luego exportados a ADS para su adecuación en la fabricación.

El primer modelo solo filtra una determinada banda de frecuencia, concretamente la de 3.5 GHz. El segundo modelo busca filtrar dos bandas, exactamente las de 3.5 GHz y 5.5 GHz y por ultimo el tercer modelo buscar filtrar 3 bandas. Los resultados se muestran a continuación:

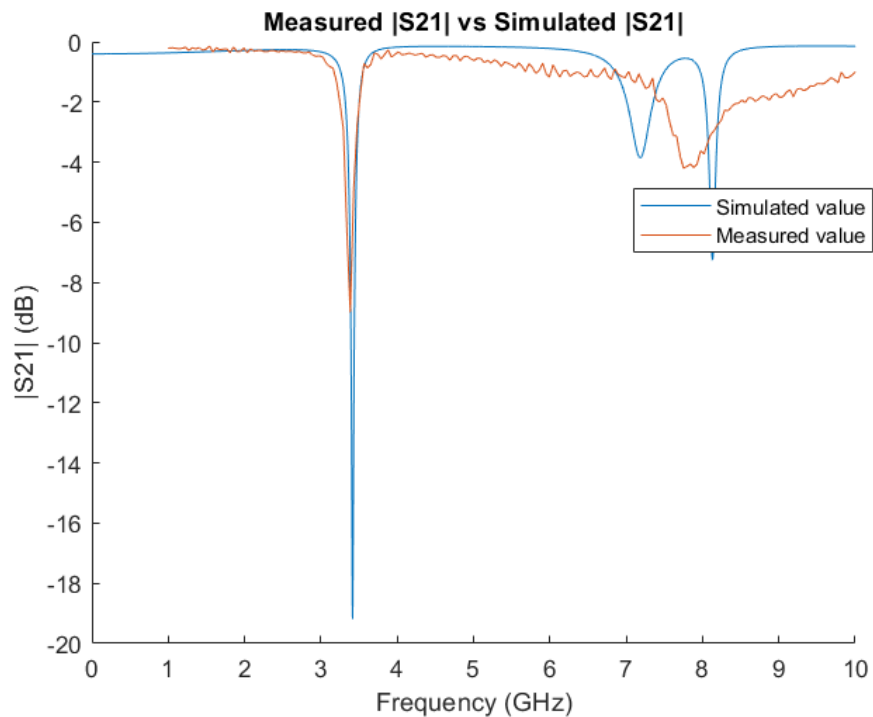


Figura 5.1 Comparación entre una celda EBG de una banda simulada y otra fabricada

En la figura 5.1 se muestra los valores simulados de la celda EBG y los valores reales después de la fabricación y toma de medidas para una celda EBG que busca filtrar frecuencias en 3.5 GHz. El modelo usado en la fabricación ha sido el de la figura 3.1 y se aprecia una diferencia de unos 9 dB aproximadamente en las medidas.

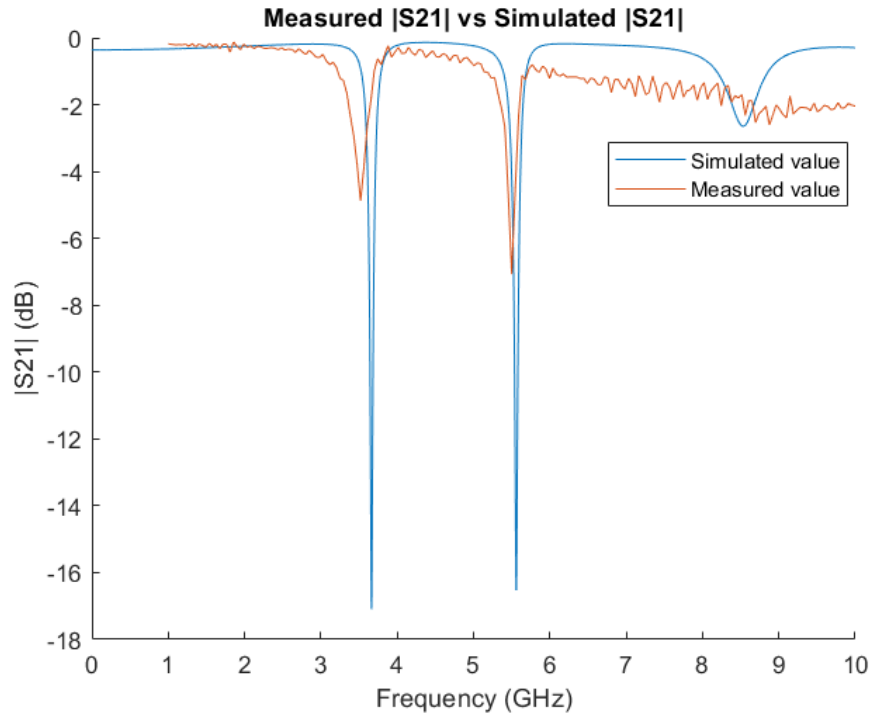


Figura 5.2 Comparación entre una celda EBG de dos bandas simulada y otra fabricada

En la figura 5.2 se muestran los resultado simulados y reales de una estructura EBG igual al de la figura 4.1. Se aprecia una diferencia de 9 dB entre las medidas.

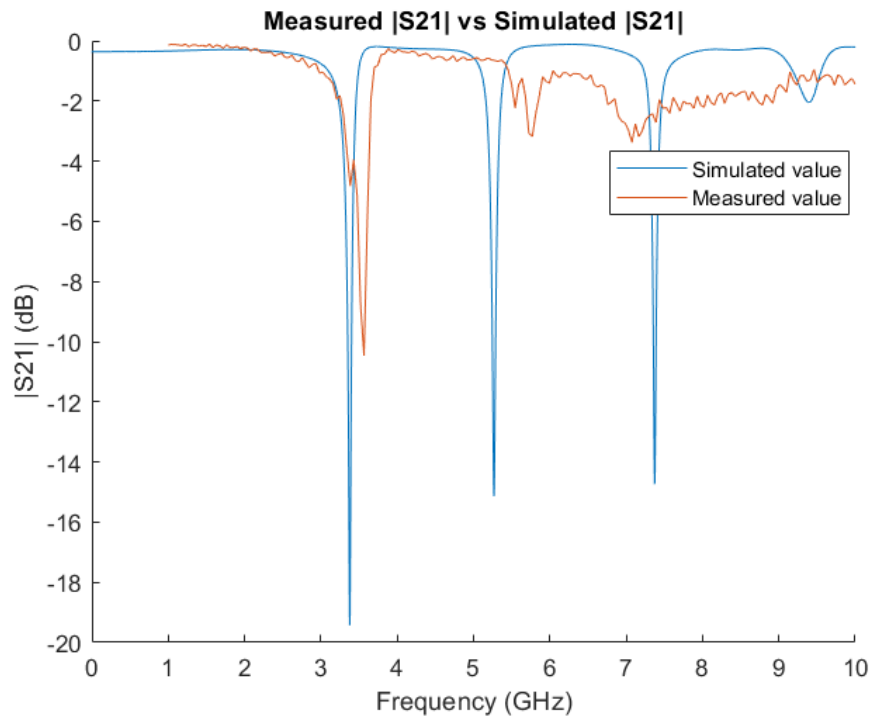


Figura 5.3 Comparación entre una celda EBG de tres bandas simulada y otra fabricada

En la última figura se ha usado el modelo de la figura 4.36. Creemos que las diferencias en dB se deben por el cómo se soldaron los conectores a las placas, creando unas pérdidas notables en los resultados.

5.2 TRABAJO FUTURO

Como posible línea de trabajo a futuro se propone el investigar sobre algún algoritmo que nos permita obtener estructuras EBG optimizadas con unas características de entrada determinadas al inicio del diseño, mostrando así que posibles formas puede tomar la celda.

Por último también se puede investigar sobre la forma o las formas de conseguir mayores prestaciones de atenuación manteniendo solo una celda unidad EBG sin necesidad de crear replicas con el único objetivo de aumentar esta atenuación, es decir, mejorar la miniaturización.

6 REFERENCIAS

- [1] E.G. Moliner, "Diseño asistido por ordenador de filtros pseudo paso bajo en guía de onda rectangular mediante el método de elementos finitos", trabajo fin de grado, Dpto. de Tecnologías Electrónicas y de Comunicaciones, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2015.
- [2] H. Obeid, H. Khettab, L. Marais, M. Hallab, S. Laurent and P. Boutouyrie, "Evaluation of arterial stiffness by finger-toe pulse wave velocity: optimization of signal processing and clinical validation," *J. of Hypertens*, vol. 35, no.1, pp. 4, April 2017.
- [3] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, 1999.
- [4] M. Kapoor, "Design Fabrication and Analysis of Tunable Planar Microwave Devices Using EBG Structures", tesis doctoral, Departament of Physics and Computer Science, Dayalbag Educational Institute, India, 2012.
- [5] E. Asensio Seco, "Estructura EBG para disminución de la radiación trasera en parches", proyecto fin de carrera, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Carlos III, Madrid, 2012.
- [6] C.M. Soukoulis, "The History and Review of the Modelling and Fabrication of Photonic Crystals," *Nanotechnology*, vol 13, pp. 420-423, 2002.
- [7] P. Kovács and T. Urbanec, "Electromagnetic Band Gap Structures: Practical Tips and Advice for Antenna Engineers," *Radioengineering*, vol. 21, no. 1, pp. 414-421, April 2012
- [8] M.A.G. Laso, M.J. Erro, D. Benito, M.J. Grade, T. Lapetegi, F. Faleone, and M. Sorolla, "Analysis and Design of 1D Photonic BandGap Microstrip Structure using a Fiber Grating Model," *Microwave and Optical technology Letters*, vol. 22, no. 4, 1999.
- [9] P. Salonen, M. Keskilammi, and L. Sydanheimo, "A low-cost 2.45 GHz photonic band-gap patch antenna for wearable systems," in 11th Int. Conference on Antennas and Propagation ICAP 2001, pp.719-724, Manchester, UK, 2001.
- [10] M. M. Sigalas, R. Biswas, Q. Li, D. Crouch, W. Llung, R. Jacobs-Woodbury, B. Lough, S. Nielsen, S. McCalmont, G. Tuttle, and K.M. Ho, "Dipole Antennas on Photonic Band-Gap Crystals Experiment and Simulation," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 15, no. 3, pp. 153-158, 1997.
- [11] R. Gonzalo, P. de Maagt, and M. Sorolla, "Enhanced Patch Antenna Performance by Suppressing Surface Waves using Photonic Band-Gap Structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp.2131-2138, 1999.

- [12] R. Gonzalo, I. Ederra, C. Mann, and P. de Maagt, "Radiation Properties of Terahertz Dipole Antenna Mounted on Photonic Crystal," *Electronics Letters*, vol. 37, no 10, pp. 613-614, 2001.
- [13] A.S. Andrenko, Y. Ikeda, and O. Ishida, "Application of PBG Microstrip Circuits for Enhancing the Performance of High-Density Substrate Patch Antennas," *Microwave and Optical technology letters*, vol.32, no.5, p.340-344, 2002.
- [14] M. Thevenot, C. Cheype, A. Reineix, B. Jecko, "Directive Photonic-Bandgap Antennas," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no 11, pp. 2115-2122, 1999.
- [15] B. Temelkuran, E. Ozbay, J-P.Kavanaugh, G. Tuttle, and K-M. Ho, "Resonant Cavity Enhanced Detectors Embedded in Photonic Crystals," *Applied Physics Letters*., vol. 72, no 19, pp.2376-2378, 1998.
- [16] M. Thevenot, A. Reineix, B. Jecko, "A Dielectric Photonic Parabolic Reflector," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 21, no 6, pp. 411-414, 1999.
- [17] R.Cosmina, "Design of electromagnetic band-gap structures using planar technology for rfid and microwave applications", tesis doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Computadores y Sistemas, Universidad de Oviedo, Oviedo, 2014.
- [18] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, "Novel 2-D Photonic Bandgap Structure for Microstrip Lines," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, pp.69-71, 1998.
- [19] F.R. Yang, K.P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "A Uniplanar Compact Photonic Bandgap (UC-PBG) Structure and its Applications for Microwave Circuits., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, pp.1509- 1514, 1999
- [20] T. Lopetegi, M.A.G. Laso, J. Hernandez, M. Bacaicoa, D. Benito, M. J. Garde, M. Sorolla, and M. Guglielmi, "New Microstrip Wiggly - Line Filters with Spurious Passband Suppression," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 9, pp. 1593-1598, 2001.
- [21] D. Nesic, "A New Type of Slow-Wave 1-D PBG Microstrip Structure without Etching in the Ground Plane for Filter and Other Applications," *Microw. Opt. Techn. Let.*, Vol. 33, no. 6, pp. 440-443, 2002.
- [22] M. Srinivas, "Design and development of ebg structured compact antenna for wireless applications," doctoral thesis, Dep. of Electronics & Communication Engineering, K L University Green Fields, India, 2019.
- [23] M. Ghahremani, C.Ghobadi, J. Nourinia, M. Sani, F. Alizadeh and B. Mohammadi, "Miniaturised UWB antenna with dual-band rejection of WLAN/WiMAX using slitted EBG structure," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 13, pp. 361-362, 2018.

- [24] S. A McCormick and W. O. Coburn, "Simulation Analysis of a Strip Dipole Excited Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structure", US Army Research Laboratory, Powder Mill Road, USA, Tech. Rep. ARL-TR-7337,2015.
- [25] T. Kamgaing and O. M. Ramahi, "Design and modeling of high-impedance electromagnetic surface for switching noise suppression in power planes," *IEEE Trans. Electrom. compat.*, vol.47, no.3, pp.482-483, Aug, 2005.
- [26] P. Kovács, "Design and optimization of electromagnetic band gap structures", doctoral thesis, Department of Radio Electronics, BRNO University of Technology, Czech Republic, 2010.
- [27] L.Long, C.Qiang, Y.Qiawei, L.Changhong and S.Kunio , "Surface-wave suppression band gap and plane-wave reflection phase band of mushroom like photonic band gap structures", *Journal of Applied Physics* , Vol. 103,pp.2-4, 2008.
- [28] K. Abdulhameed, M. Isa, M.Ibrahim, M. Zin, Z. Zakaria and M.Mohsin, "Review of Radiation Pattern Control Characteristics for The Microstrip Antenna Based On Electromagnetic Band Gap(EBG)", *Journal of Telecommunication,Electronic and Computer Engineering*, Vol. 10, no. 3, pp.130,2018.